В. П. Кригер и Дж. Д.Джестин

СПРАВОЧНИК ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

В. П. КРИГЕР и Дж. Д. ДЖЕСТЙН

СПРАВОЧНИК

по

ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМ

Авторизованный перевод с английского

С. Я. ВАРТАЗАРОВА

Под редакцией

доктора техн, наук,

проф. Ф. Ф. ГУБИНА

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА I960 ЛЕНИНГРАД

ЭГ-5-5(3)

В справочнике изложены вопросы, проектирования и расчета гидротехнических сооружений гидроэлектростанций. Содержание справочника отражает взгляды американских специалистов и применяемые в США методы.

Приводятся конструкции бетонных, железобетонных, земляных и набросных плотин, возводимых в различных геологических условиях.

Специальный раздел посвящен проектированию и расчету водоприемных и водосбросных сооружений и размещению их в общей схеме ГЭС.

Справочник рассчитан на инженеров, работающих в области проектирования, строительства и эксплуатации ГЭС, и может быть использован студентами гидротехнических факультетов высших учебных заведений.

Авторизованный перевод Вартазарова С. Я-

Техн, редактор *Ларионов Г. £.*

Редактор *Орлов В. А.*

Подписано к печати 2/VI 1960 г.

Сдано в пр-во 19/111 I960 г.
Формат бумаги 70 X 108/16
11,64 п. л.
13 уч.-изд. л.
Т-07140 Тираж 6 ООН
Цена 9 р. 60 к.
Зак. 2153

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Справочник по гидроэлектростанциям» В. П. Кригера и Дж. Д. Джестина хорошо известен советским специалистам-гидроэнергетикам по переводу первого издания , справочника, вышедшего в 1937 г. В тот период на русском языке почти не было работ, в систематическом виде излагавших опыт гидроэнергетического строительства в Соединенных Штатах Америки.

За последние два десятилетия в Советском Союзе опубликовано большое количество монографий по гидроэлектростанциям, учебных пособий и статей, отражающих опыт отечественного гидроэнергостроительства. Госэнергоиздат предпринял издание ряда иностранных работ для ознакомления советских читателей с зарубежным гидроэнергостроительством.

Одним из фундаментальных трудов, появившихся за последние годы в США, является второе издание «Справочника по гидроэлектростанциям», вышедшее в Нью-Йорке в 1950 г. Книга написана коллективом авторов, специалистов-гидротехников и «в значительной 'мере отражает современный уровень гидроэнергетики в США. Не все в этом труде одинаково ценно. По многим вопросам в нашей литературе имеются более глубокие разработки, по некоторым разделам в Советском Союзе накоплено больше опыта. Вследствие этого издательство предприняло сокращенный перевод книги в той части, которая может представить интерес для проектных и строительных организаций.

При подготовке сокращенного перевода Справочника основное внимание было уделено сохранению целостности изложения основного круга вопросов, относящихся к проектированию и строительству ГЭС. Это было необходимо для того, чтобы Справочник мог быть использован как в проектных и строительных организациях, так и в высших учебных заведениях как дополнение к учебным пособиям по курсу гидроэлектростанций.

В то же время три подготовке перевода не стояла задача изложить только те вопросы, которые отсутствуют в отечественных изданиях, •• это обеднило бы перевод и исключило бы возможность разумного использования опыта гидроэнергостроительства в США. Поэтому в ряде случаев в тексте перевода сохранены некоторые очевидные положения и простейшие расчеты, имеющие методологическое значение.

Так, в качестве вводной, первой главы Справочника дана классификация ГЭС по функциональному признаку— $1_{П}$о характеру участия ГЭС в покрытии графика нагрузки. Такой подход авторов Справочника, однако,, представляет определенный интерес, когда ГЭС проектируется, для заполнения определенного участка графика нагрузки. Приводимые <в главе иллюстрации поясняют рекомендуемую классификацию. В этой же главе было сочтено уместным привести краткие сведения по удельным капиталовложениям на ТЭС и ГЭС, себестоимости киловатт-часа и принятым в США амортизационным срокам по отдельным сооружениям.

В главе второй перевода.приведены данные по проектированию и строительству гравитационных бетонных плотин. Хотя перечень сил, действующих на плотину, и приемы их

определения мало отличаются от изложенных, например в курсе пр оф. М. М. Гришина «Гидротехнические сооружения», но эти данные нужны для обоснования приводимых в Справочнике практических правил проектирования плотин. Некоторые соображения по учету сил противодавления, расчету действия сейсмических сил, величинам расчетных коэффициентов и т. п. представляют самостоятельный интерес.

Из обширной главы оригинала, посвященной гидравлическим расчетам, помещены , в соответствующие главы перевода лишь отдельные данные: : таблицы коэффициентов шероховатости каналов, упрощенный расчет быстротока и некоторые другие. Поскольку в отечественной литературе расчеты гидравлического удара и уравнительных резервуаров разработаны очень подробно рядом авторов, в гла- < ву, посвященную турбинным трубопроводам, включены только расчеты удара по графикам Аллиеви и простейv шие формулы по расчету, резервуаров. Точные методы расчета (Шнейдера, Ангуса и др.) в оригинале не тцриве- - лены.

Следует отметить, что для изложения Справочника характерна ссылка на простейшие методы гидравлических и статических расчетов, причем авторы в ряде случаев отмечают, что для более ответственного проектирования должны применяться точные расчетные -приемы. Ряд расчетов, известных советским читателям по их более подробному изложению в отечественной или зарубежной литературе, опущен в переводе. В соответствующих главах приведены простейшие, полу-эмпирические приемы, которые, могут представить интерес для предварительных • стадий проектирования.

Значительное место в Справочнике уделено организации проектирования, "составлению смет, отчетности и взаимоотношениям между заказчиками и фир|мам1ид1одря'дчи1ками.[1] Изложение этих разделов имет сугубо специфичебиий характер* для условий США, и потому эти главы .‘исключены из перевода, как не представляющие интереса Для широких кругов советских гидро- 'Техников. ‘ 7 ‘ ■ л

В Справочнике достаточно подробно рассматриваются вопросы экономики гидроэнергетики, включая характеристику удельных капиталовложений, сравнение затрат на рабочую силу и материалы и другие вопросы. Поскольку цены на материалы, условия оплаты рабочих, а также принципы оценки экономичности капиталовложений в США не могут быть непосредственно сопоставлены с аналогичными показателями **в** СССР, опубликование этих глав без квалифицированного анализа этих вопросов специалистами в области экономики не представлялось целесообразным. Исходя из этих соображений, -соответствующие главы оригинала также не включены в перевод.

Как и в первом издании, опущена вся электротехническая часть, основанная на американских нормах и фирменных требованиях. Кроме того, эти вопросы уже разбирались в специальных монографиях.

Таким образом, основное содержание сокращенного перевода составляют вопросы проектирования и конструирования гидротехнических сооружений и эксплуатации как гидромеханического оборудования, так и гидроэлектростанций в целом.

Перевод дается в свободном изложении, за исключением тех мест, в которых содержатся 'рекомендации или утверждения, имеющие принципиальный характер. В этих случаях формулировки приведены в тщательное соответствие с оригиналом. Критический разбор рекомендаций и суждений, даваемых авторами Справочника, не входил в задачу переводчика и редактора.

Поскольку авторами Справочника обобщен обширный опыт строительства ГЭС в США и Европе, при переводе уделялось особое внимание практическим рекомендациям по проектированию и строительству.

Для перевода отобраны из Справочника иллюстрации, необходимые для понимания текста, а также те, на которых даны современные конструкции и типы сооружений или интересные конструктивные детали.

В оригинале, учитывая справочный характер книги, принято мелкое дробление теиста иго отдельным вопросам. В переводе принято укрупненное деление на главы и параграфы со сквозной нумерацией рисунков и формул. Все формулы, таблицы и графики даны в переводе в метрических мерах, за отдельными исключениями, оговоренными в тексте.

Каждая глава Справочника снабжена небольшой библиографией, однако цитированная литература или устарела, или частично уже известна советским гидротехникам, поэтому библиографические сведения в перевод включены не полностью.

Переводчик

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Глава первая. **Типы гидроэлектростанций** 7

Глава вторая. **Массивные гравитационные бетонные плотины. . .** 12

1. Силы, действующие на плотины . 12
2. Требования к устойчивости плотины 18
3. Бетон для гравитационных плотин 20

Глава третья. **Арочные и контрфорсные плотины.................................... .** 23

4. Арочные плотины................................ 23
5. Пример расчета арочной плотины 27
6. Контрфорсные плотины...................... 28

Глава четвертая. **Земляные и набросные плотины...** 31

7. Проектирование и возведение земляных плотин.......................... 31
8. Элементы земляных плотин ... 38
9. Набросные плотины.................... 42

Глава пятая. **Подготовка и защита оснований плотин ....** 45

10. Подготовка скального основания 45
11. Подготовка земляных оснований 47
12. Рекомендуемые конструкции подземного контура.................... 50
13. Размывы за плотинами . . • . . 52

Глава шестая. **Водоприемные и водосбросные сооружения ...** 53

14. Водоприемники гидроэлектростанций 53
15. Водосбросные сооружения ... 62
16. Затворы сбросных и водоприемных сооружений.......................... 68

Глава седьмая. **Деривационные сооружения ....** 74

17. Каналы... 74
18. Вспомогательные сооружения на каналах 80
19. Деревянные и бетонные трубопроводы.. 82

Глава восьмая. **Турбинные трубопроводы ....** 84

20. Типы и конструкции стальных трубопроводов 84
21. Нагрузка на трубопровод от гидравлического удара....................... 88
22. Некоторые характеристики уравнительных резервуаров................ 95

Глава девятая. **Туннели..** 98

23. Общие соображения........................... 98
24. Способы проходки туннелей . . 100

Глава десятая. **Машинные здания гидроэлектростанций и их оборудование ....** 109

25. Общая компоновка............................ 109
26. Конструктивные элементы подводной части здания.................... НО
27. Верхнее строение машинного здания 120

Глава одиннадцатая. **Эксплуатация гидроэлектростанций ....** 125

28. Общие вопросы организации эксплуатации 125
29. Эксплуатация оборудования . . 129
30. Содержание зданий и оборудования 131
31. Организация водного режима . . 133

Литература 136

ГЛАВА ПЕРВАЯ

ТИПЫ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Гидроэлектростанции в Справоч- нике классифицированы по ПрИНДИИУ участия в покрытии графика нагрузки следующим образом.

1. ГЭС на бытовом стоке без регулирования.
2. Базисные ГЭС.
3. ГЭС на бытовом стоке с суточным регулированием.
4. Пиковые ГЭС.

Гидроаккумулирующие ГЭС рассматриваются как 'разновидность пиковых ГЭС.

Гидроэлектростанции, работающие на бытовом стоке, имеют низкую обеспеченность и используют только то количество воды в реке, которое поступает к водоприемным сооружениям. Низкие плотины поддерживают необходимый уровень воды в верхнем бьефе. Деривационные, 'высокойапорj ные ГЭС с плотинами недостаточной высоты для создания регулирующего бассейна также могут быть отнесены к этому типу. ГЭС без регулирования работают в различных зонах графика нагрузки, в зависимости от располагаемой мощности ГЭС по воде. Стоимость вырабатываемой энергии такими ГЭС невелика и во всяком случае ниже, чем на других типах гидроэлектростанций. Их основная задача как производителей электроэнергии-— экономия угля, который был ы сожжен на тепловых электростанциях.

Под базисными ГЭС понимаются установки с высокой обеспеченностью, работающие постоянно в базисе графика нагрузок. Полный расход 1 редко превышает минимальный расход реки. Этот тип ГЭС не характерен для условий СССР. Примерами этого типа ГЭС в США являются установки: Шелкофф (рис. 1), Квинстон-Чиппева (рис. 2) на р. Ниагаре, Богарнуа (рис. 3) на р. Св. Лаврентия или 1ЭС Бонневиль на р. Колумбии Коэффициент нагрузки базисных ГЭС колеолется от 70 до 100%-

ГЭС третьего типа (на бытовом стоке с суточи ым р е гу л и р о в а 11 и с м) обычно располагает регулирующим бассейном _ _ •с объемом, достаточным для суточного, а в некоторых случая и для недельного регулирования. Для ГЭС этого типа существенное значение имеет режим нижнего бьефа, паводки не должны подтапливать гидр-оэ л ектр останцию. Хар актер но также высокое соотношение между расчетным расходом ГЭС и минимальным расходом реки, доходящее до 10—20 Полный расход установки составляет 0,015-0,03 *мЧсек* на квадратный километр водосборной площади При наличии в энергосистеме тепловых электростанций нередко можно встретить полную взаимозаменяемость ГЭС и ТЭС для покрытия отдельных участков графика нагрузки.

При избытке воды эти ГЭС раоотают в базисе графика. При сезонных уменьшениях речного стока они меняют свое положение в графике нагрузки и в меженный период переходят полностью в пик графика. Год<> вой коэффициент нагрузки для 1. этого типа колеблется от 4U до оо,$_0$- Примерами таких установок мо гут служить ГЭС Коновинго (рис. 4) и др.

Многие ГЭС, имеющие водохранилища сезонного и многолетнего' регулирования, могут быть использованы как пиковые ГЭС, хотя они и не явля-

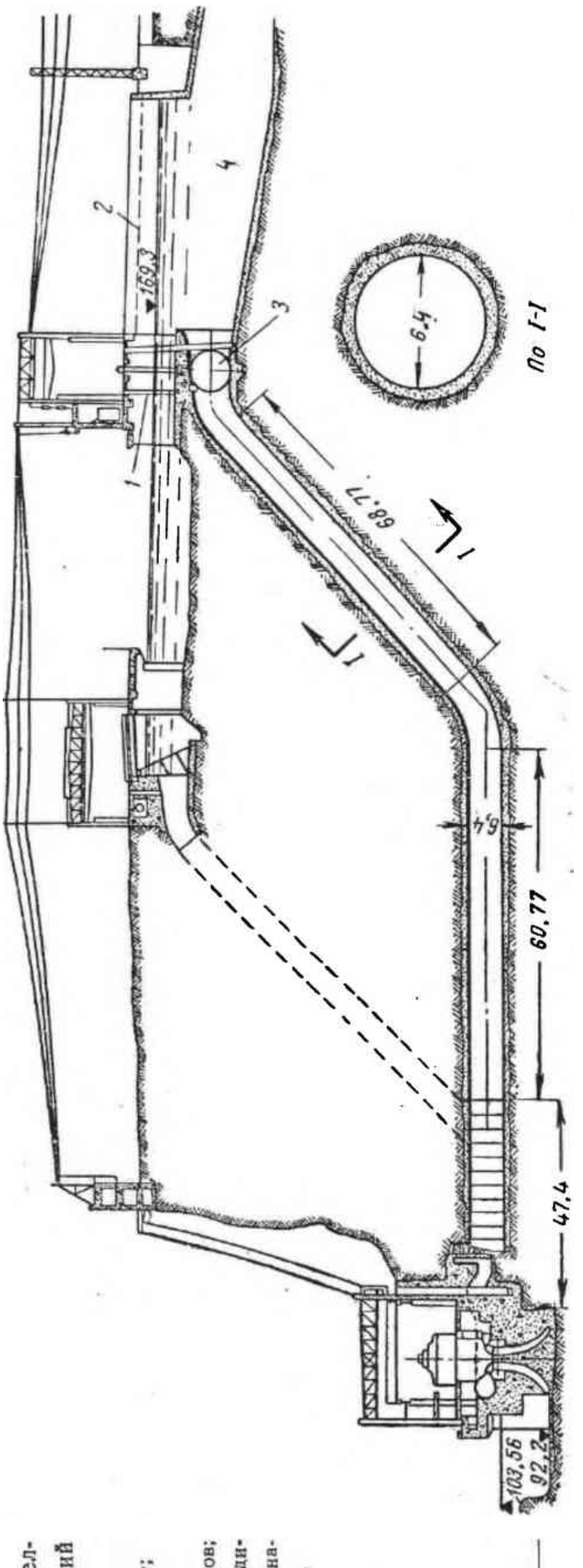


Рис. 1. ГЭС Шелкофф, Ниагарский водопад.
$N = 330$ тыс. *квт*; $H = 65,1$ *м*.
1 — паз для затворов; 2 — водослив; 3 — дисковый затвор; 4 — напорный бассейн.

ются такими по проекту. Это объясняется тем, что режим потребителей может не соответствовать всей располагаемой пиковой мощности^ В ряде случаев установки этого типа имеют суточный коэффициент нагрузки 30—100%- Характерными примерами могут служить установки Гувер на р. Колорадо и установка Грэнд-Кули на р. Колумбии. При проектировании таких ГЭС учитывается возможность роста нагрузки, и потому установленную (мощность обычно рассчитывают по возможной (пиковой ’мощности. При низкой стоимости установленного киловатта целесообразно предусматривать возможность последующего расширения ГЭС.

Для снятия пиков графика нагрузки энергосистемы проектируются специальные пиковые ГЭС, имеющие большую установленную мощность по сравнению с мощностью водотока. Такие станции обычно обладают сезонным регулированием, сравнительно высоким напором и располагаются на малых водосборных бассейнах. Расчетный расход ГЭС составляет примерно 0,06—0,1 *м?!сек* на квадратный километр водосборной площади. На рис. 5 показана схема расположения пиковых ГЭС на рр. Таллуле и Тугало. Характерным примером пиковой ГЭС является установка Багнелл (рис. 6).

Пиковые ГЭС особенно эффективны для систем с резкими и кратковременными пиками в суточном графике нагрузки, создаваемыми совпадением осветительной, промышленной и транспортной нагрузок (рис. 7). Этот график требует наличия большой резервной мощности. Очевидно, что сохранение горячего резерва на тепловых электростанциях исключительно невыгодно. Пиковые ГЭС наиболее приспособлены для снятия таких острых пиков.

Экономичность пиковых ГЭС очень высока, так как увеличение мощности проектируемой станции может быть достигнуто за счет дополнительных расходов только на водоприемники, трубопроводы, здание ГЭС и оборудование, что составляет всего 30—35% стоимости гидроузла. Выбор мощности

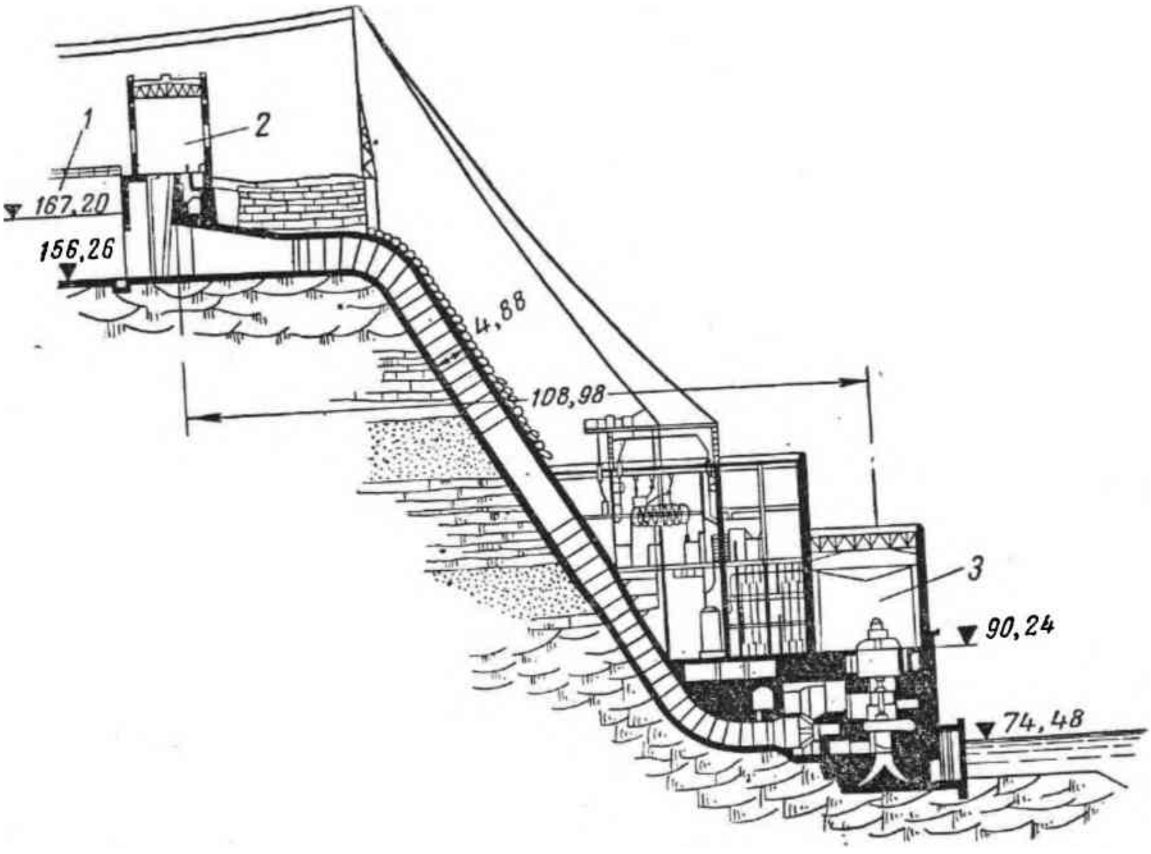


Рис. 2. ГЭС Квинстон-Чиппева, Ниагарский водопад.

Af = 368 тыс. *кет'*, *H* = 88,5 *м.*

/-напорный бассейн; 2-помещение для затворов; 3Г—машинное здание.

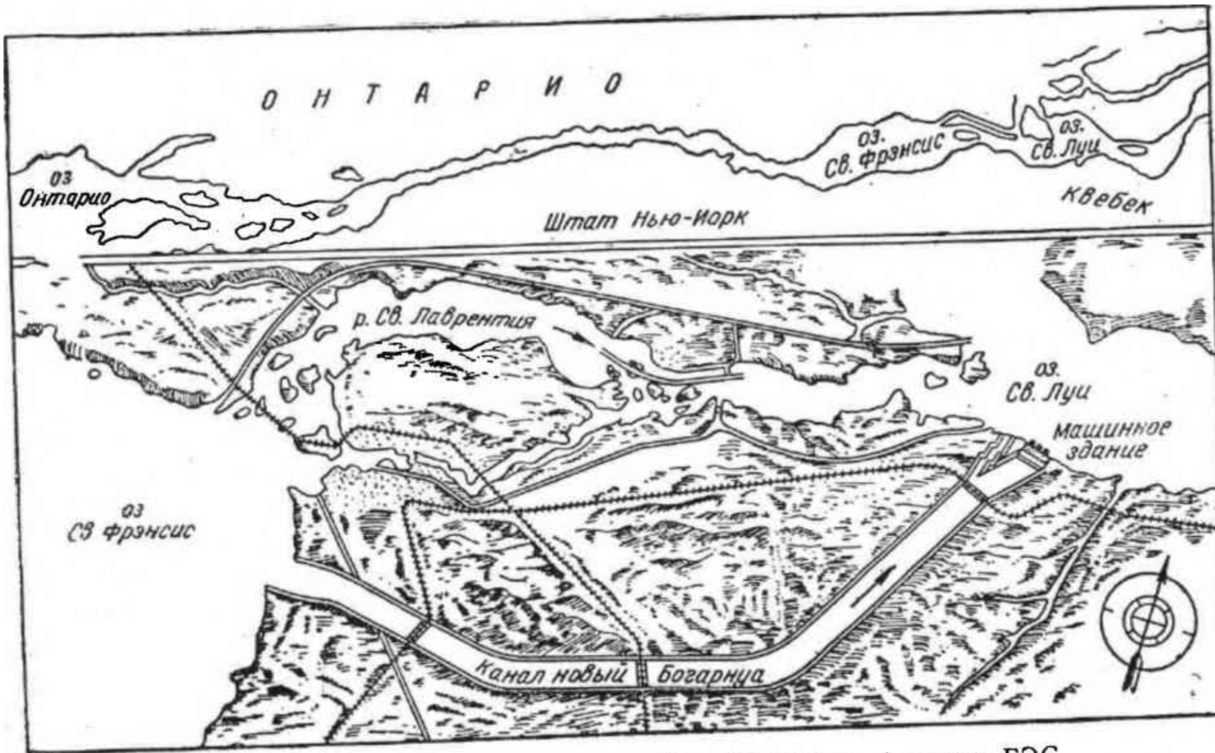


Рис. 3. Гидроузел Богарнуа на р. Св. Лаврентия базисная ГЭС.

$N = 315$ тыс. *квт*; $H = 25{,}3$ *м*.

v

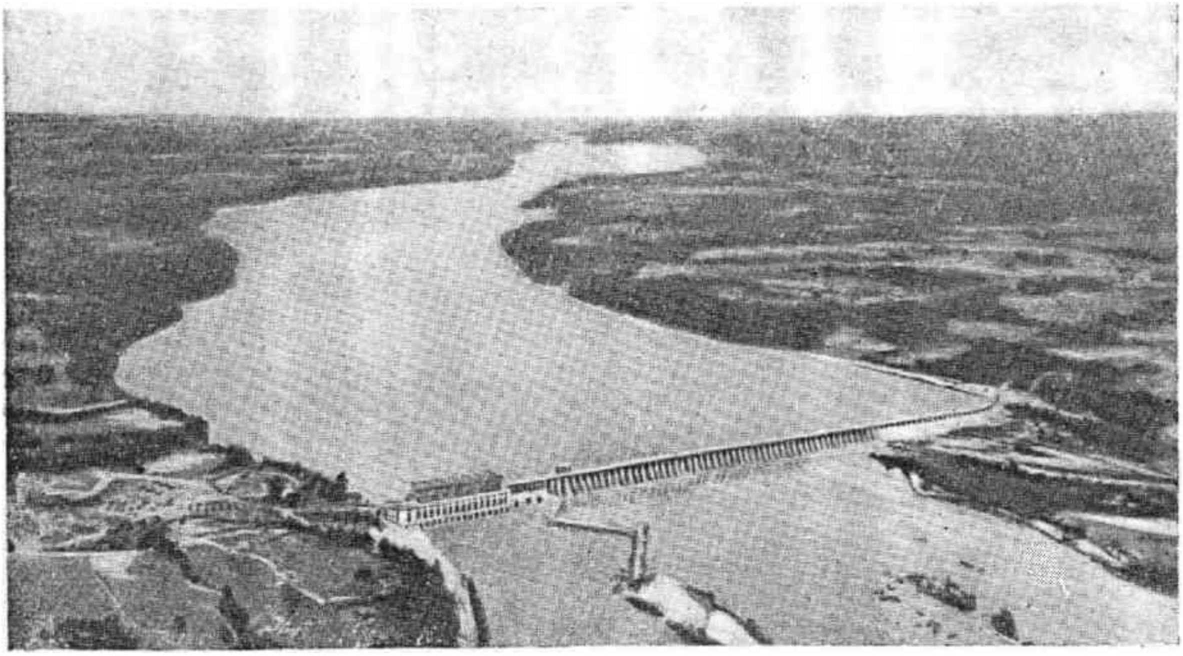


Рис. 4. ГЭС Коновинго, р. Сусквегана; ГЭС с суточным регулированием.
К = 252 тыс. *кет', Н* = 27,13 *м*

ГЭС и типов ее сооружений определяется подробными экономическими расчетами.

Уместно привести некоторые экономические показатели тепловых и гидроэлектрических станций. По данным справочника, в Соединенных Штатах Америки мощность всех тепловых электростанций примерно в 2,5 раза превышает мощность гидроэлектростанций. Расход угля на производство электроэнергии ТЭС составлял для 1946 г. 0,61 *кг/квт • ч*, а на некоторых наиболее эффективных ТЭС до 0,45 *кг!квт ч*. Удельные капиталовложения на установленный киловатт для ТЭС составляют 100—200 долл.

Так, для ТЭС с тремя агрегатами по 165 тыс. *кет* капиталовложения составляют 150 *долл/квт*. Капиталовложения снижаются для крупных ТЭС, использующих воду рек, что исключает необходимость устройства прудов-охладителей.

Удельные капиталовложения на ГЭС колеблются в более широких пределах, в зависимости от мощности и типа ГЭС, и для условий США составляют 100—400 долл, на установленный киловатт. Так, для ГЭС приплотинного типа мощностью’ 120 тыс. *кет* капиталовложения составили около 100 *долл /кет*, при мощности 60 тыс. *кет* они возрастают до 150 долл., а



Рис. 5. Пиковые ГЭС на рр. Таллула и Тугало.
1 - ГЭС Буртон; *2* - ГЭС Накоочи; *3* - ГЭС Таррора; *4* - ГЭС Таллула; 5 - ГЭС Тугало; *6* - ГЭС Ионах.

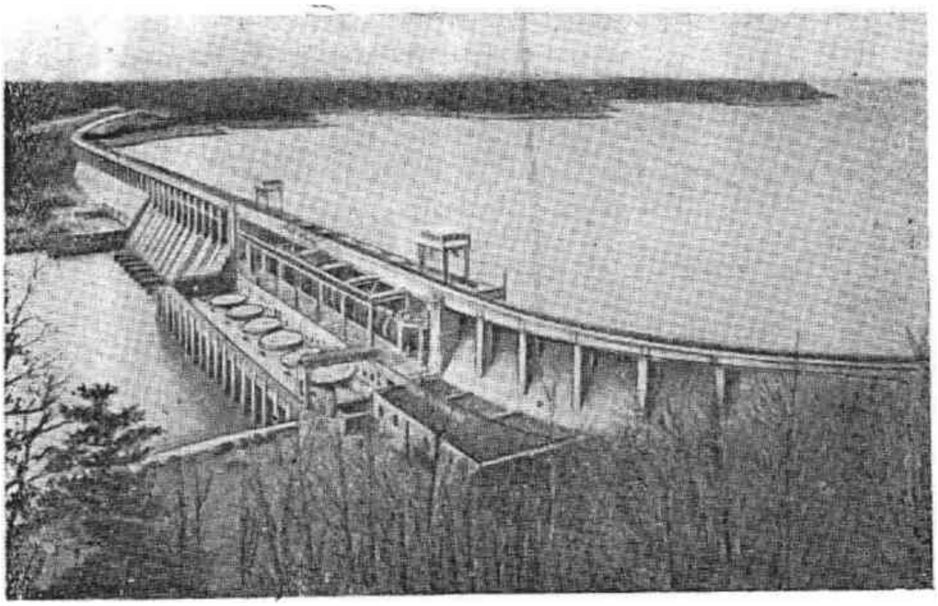


Рис. 6. ГЭС Багнелл, р. Миссури; пиковая станция.
N — 121 тыс. *кет; Н* = 27,4 *м.*

при мощности 40 ТЫС. *кет*—до 2'00 долл.

Для экономики гидроэлектростанций существенны сроки службы[5] отдельных ее элементов. По материалам ряда ГЭС 'считается, что такие сооружения, как земляные и маос'И'вные бетонные плотины, водоприемники, туннели, подводные части машинных зданий, имеют практически неограниченный срок службы. Для стальных трубопроводов срок службы составляет 30 лет, для бетонных 50 лет; для металлоконструкций: затворов, ‘ решеток, клапанов — 20—30 лет, для гидромеханического оборудования: турбин, регуляторов . 30 лет.

Эксплуатационные издержки, исчисленные на 1 *кет* установленной мощности ГЭС, колеблются от 1 до 2 долл, в год.

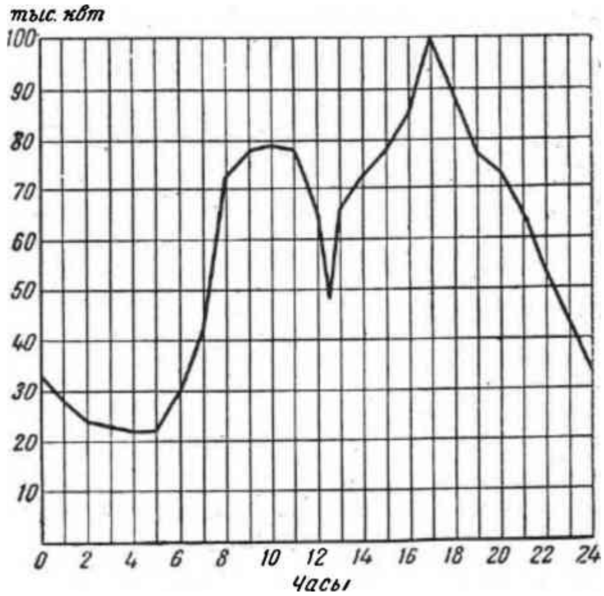


Рис. 7. Типичный декабрьский суточный график нагрузки промышленного района.

ГЛАВА ВТОРАЯ

МАССИВНЫЕ ГРАВИТАЦИОННЫЕ БЕТОННЫЕ ПЛОТИНЫ [1]

Массивные гравитационные бетонные плотины представляют собой постоянные сооружения. Опыт показывает, что ежегодные расходы для такого типа плотины больше, чем для земляных или набросных, или меньше, чем для иных типов плотин. Массивные плотины применимы для любых условий, но их высота ограничивается прочностью основания. Для створов, в которых скала находится на значительной глубине под поверхностью, земляная плотина обычно является более дешевой.

Разница в стоимости между массивной и пустотелой гравитационными плотинами зависит от местных условий. Массивная плотина требует меньше цемента на 1 $м^3$ бетона и не имеет армировки. С другой стороны, пустотелые плотины требуют значительно меньше бетона на погонный метр длины. Так, наиболее легкий тип требует лишь 35—40%' бетона, затрачиваемого на массивную плотину. Для отдаленных местностей, где строительные материалы дороги, пустотелая плотина имеет обычно меньшую строительную стоимость, чем массивная.

1. СИЛЫ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ПЛОТИНЫ

При расчете плотины должны учитываться следующие силы:

статическое давление воды;
противодавление;
давление льда;
давление грунта и наносов;
вес плотины;
сейсмические силы;
реакция основания.

Природа большинства этих сил такова, что она не позволяет точно их определить. Величина, направление и точка приложения многих сил должны быть выбраны проектировщиком очень тщательно.

Давление воды. Полное давление воды на напорную грань плотины (на 1 *пог. м)* определяется зависимостью для треугольного профиля плотины (рис. 8)

/>=4у а 2 (1)

и для трапецеидального профиля (рис. 9)

$P = ^(h^2 - h^2_r).$ (2)

Для водосливных плотин при учете скорости подхода давление воды должно определяться напором h_2

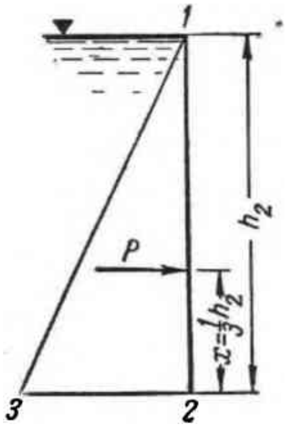


Рис. 8. Треугольная эпюра давления воды на вертикальную стенку.

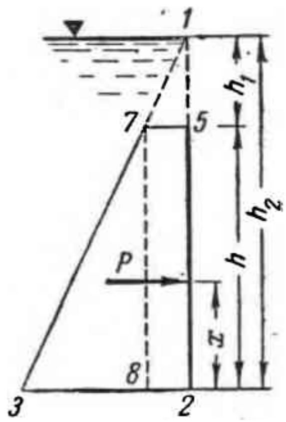


Рис. 9. Трапецеидальная эпюра давления воды на вертикальную стенку.

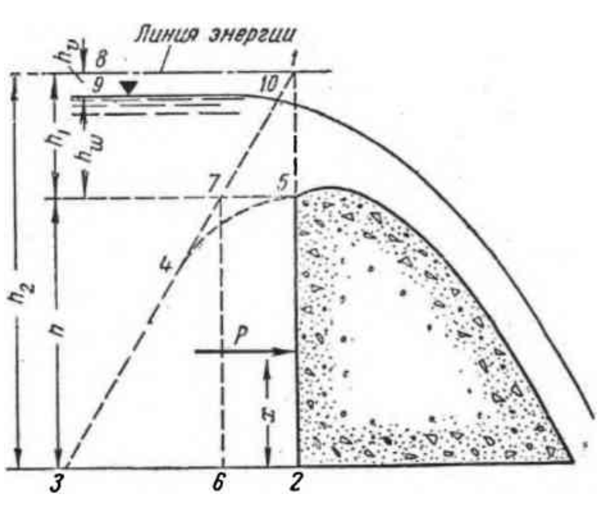


Рис. 10. Трапецеидальная эпюра давления воды на вертикальную грань водосливной плотины.

[1] В главу включены общие сведения по проектированию бетонных плотин и некоторые рекомендации по выбору действующих сил, полезные для предварительного проектирования. Более подробные данные изложены в [Л. 1 и 2].

(рис. 10) от линии энергии до подошвы ПЛОТИНЫ. Для ВОДОСЛИВНЫХ плотин вакуумного профиля должна учитываться (величина 'вакуума как сила, ухудшающая устойчивость плотины.

Оротиводавление. Различные формы эпюр противодавления даны на рис. Иди *б* для случая плотины на скальном основании.

В предположении однородности контактного шва между подошвой плотины и линией основания величина давления 'будет меняться от у/i2 (линия *2*—5) в точке *2* (рис. Ill,*а) Royh-t* в точке *3* (линия *3—5).* При полном закрытии шва эпюра давления даетс'я линией *6—5.* При частичном закрытии давление в точке *2* дается 7—*5:*

$$p'й=;[л_4+®(^{/}{'}_2 —л_4)]. \quad (3)$$

а в точке *3*

$$p'u = V\!- \quad \textbf{(4)}$$

Полное противодавление определяется формулой

$$= \bullet \, (^5)$$

где *р* — удельное противодавление на верховой грани;

р —удельное противодавление на низовой грани;

а — коэффициент противодавления, характеризующий отношение непогашенного напора к полному;

W_u — полное противодавление;

р— площадь основания плотины.

Для ответственных высоких плотин, расположенных на скале, часто устраивается цементационная завеса у верхового зуба, дополненная скважинами, пробуренными за завесой и играющими роль дренажной системы. Эффект дренажной системы состоит в уменьшении эпюры противодавления от контура *2—7—5—3* до контура *2—7—9—5—3* (рис. 11,6). На практике скважины дренажа располагаются настолько близко к завесе, что эпюра противодавления может быть принята *как* *2—9—5—3.* Опыты на существующих плотинах с цементационной завесой и дренажами показывают, что коэффициент противодавления а не превышает $^2/_3$ • Во многих случаях

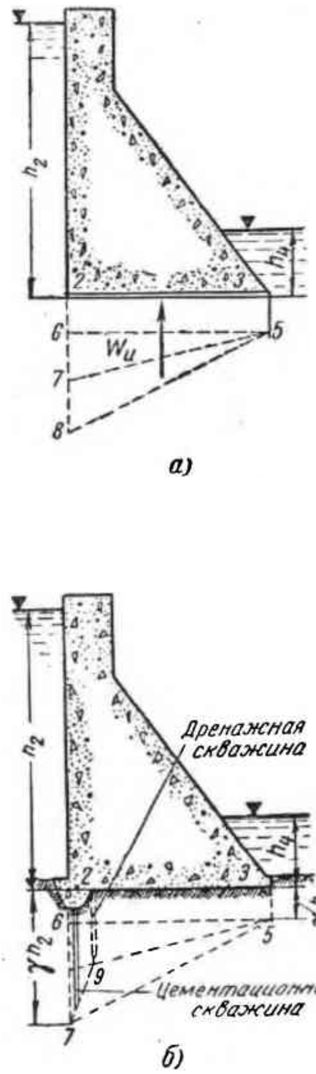


Рис. Н. Диаграмма противодавления.

а = $^1/_2$, а при тщательном выполнении работ близок к нулю.

Были сделаны 'предположения, что для плотин на скале только небольшой процент площади основания подвержен противодавлению, однако опытных данных по этому вопросу недостаточно. Поэтому рекомендуется включать в расчет все 100% площади, подверженной давлению, при любой пьезометрической линии *7—5.*

В случае плотин на скале, не имеющих завесы или дренажа, значения а теоретически будут равны единице, и эпюра противодавления будет соответствовать полному перепаду между верхним и нижним бьефами. Практически же для невысоких и средней высоты плотин на плотных скальных основаниях коэффициент а не должен равняться единице.

Для тщательно (построенных плотин на скальном основании как -в теле плотины, так и по контакту с основанием (могут быть допущены небольшие растягивающие напряжения, порядка 6—9 *кг/см*^{2}. Этого достаточно, чтобы воспринять противодавление примерно -в 60—90 *м вод. ст.* Следовательно, все плотины на скальных основаниях высотой 60—90 *м* должны быть снабжены дренажами как в основании, так и в плотине; в противном случае a должно быть принято равным единице.

Уплотнившиеся наносы перед плотинами с плотностью, равной или большей плотности основания, увеличивают полное давление, действующее на плотину.

Для предварительных проектных проработок плотин на скальных основаниях, не имеющих разработанной схемы цементационной завесы и дренажа, могут быть рекомендованы следующие значения a, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Высота плотины[1]	Тип скального основания	Завеса или дренаж	a
Средняя	Среднетрещиноватая скала с горизонтальной • слоистостью	Нет	1
Высокая	Очень плотная скала с горизонтальной слоистостью	Есть	| 0,75
Средняя	То же	Есть	
Высокая	Слаботрещиноватая скала	Есть	0,67
Средняя	Монолитная скала	Нет	
Высокая	То же	Есть	0,50
	В остальных случаях (для скальных оснований)		

[1] Плотины средней высоты — 60 — 90 *м*, высокие плотины—выше 90 *м*.

Для плотин на нескальных основаниях без зуба или дренажа величина противодавления (приближенно определяется по формуле (5) при значении a, равном единице; действительная величина противодавления может быть получена по рис. 42 гл. 5.

Давление льда. Могут быть даны следующие рекомендации по определению давления льда. На рис. 12 давление дается в функции градиента температуры воздуха, толщины льда и бакового расширения.

Кривые *A*, *B*, *C* используются при изменении температуры воздуха на 2,7; 5,5 и 8,2° С в час. Все кривые вычислены в предположении, что начальная температура льда меняется линейно от 4,5° С 1на поверхности -до 0°С на нижней (грани ледяного покрова. Предполагается, что температура воздуха растет до 0°С и остается постоянной на этом уровне до тех пор, пока в ледяном покрове, не установится температура около 0°С.

Максимальный градиент температуры устанавливается по метеорологическим данным района. Практически во всех районах может иметь место устойчивый подъем температуры в течение нескольких часов примерно на 3° С в час. Градиенты, доходящие до 8,2° С в час, могут наблюдаться при интенсивных северных ветрах.

Максимальная толщина льда, ожидаемая в районе, может быть получена из данных наблюдений. По территории Соединенных Штатов толщина льда редко превосходит 0,6—0,9 *м.*

Величина бокового сжатия ледяного покрова зависит от топографии местности и типа сооружений. Если ледяной покров примерзает к скалистым берегам или к вертикальной береговой стенке, то сжатие будет полным. Если один из берегов более пологий, то

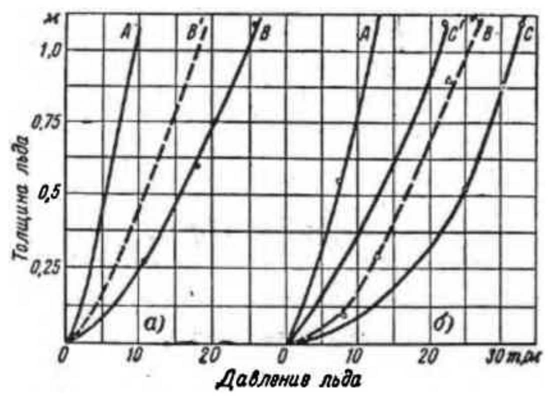


Рис. 12. Давление льда при переменной толщине льда и температуре воздуха.
-------------- без бокового сжатия;--------------- при полном боковом сжатии.

сжатия не возникает. Кривые на рис. 12 составлены для очень суровых условий и представляют собой предельное давление льда.

Кривые (<рис. 12,*а)* даны без учета влияния солнечной энергии. При прямом облучении ледяного покрова солнечными лучами возникает дополнительный подъем температуры, который приводит к увеличению давления льда (рис. 12,6).

Наихудшие условия для водосливных плотин в отношении давления льда возникают тогда, когда ледяной покров находится на уровне гребня водослива.

Давление грунта и наносов. В некоторых случаях бетонные плотины подвержены давлению грунта с верховой или низовой стороны. Это давление обычно настолько незначительно, что им можно пренебречь.

Наносы откладываются перед плотиной на большую высоту, и их давление должно быть учтено, если только не принимаются специальные меры для их промыва. При полном водохранилище учитывается объемный вес взвешенных водой наносов, при опорожненном — в расчет вводится объемный вес насыщенных водой наносов.

Объемный вес наносов в воде равен:

Ъ=Т,— Х(1 — я) = ъ('1^у-Н (6)

Объемный вес насыщенных наносов равен:

$$\gamma_3 = \gamma_1 + n\gamma = \gamma + \gamma_1 \left(\frac{\gamma_s - 1}{\gamma_s} \right), \quad (7)$$

где — объемный вес в сухом состоянии, *т/м*^{3}*;*

у — объемный вес воды;

n— пористость;

$у_5$ — удельный вес материала наносов.

Для определения величины давления наносов используется формула Ренкина:

р hA /1 — Sin \ zg\
2 +sln ? /’ ' '

где P_s — полное горизонтальное давление наносов, *т\пог. м;*

$у_{2;}$з — объемный вес наносов, *т/м*^{3} (значениями $у_{2\cdot3}$ могут быть либо $у_2$, либо $у_3$);

h_s — глубина наносов, *м;*

<р— угол внутреннего трения наносов.

Сила P_s направлена горизонтально и расположена на высоте $^2/_3$ h_s от основания плотины. Формула предусматривает обычные условия для расположения наносов и не учитывает трения между наносами и плотиной.

Обычные значения констант для расчета могут быть приняты равными: объемный вес наносов в сухом состоянии Yi = 1,6 т/ж^3, *п* — 0,4; удельный вес $у_s$ = 2,67.

Высота волны. Верхняя зона плотин подвержена давлению волн. Размеры волн зависят от площади водохранилища, скорости ветра и других факторов. Знание высоты волны необходимо для предупреждения перелива воды через верх плотины. Расчет ведется по формуле Стивенсона. Молитор уточнил формулу Стивенсона, включив в нее скорость ветра:

$/г_{ю=}$= 0,032 l/VD'+0,76 — *0,26*^{4}*/D,* (9)

где h_w — высота волны, ж;

V — скорость ветра, *км/ч;*

D — длина водной поверхности, подверженная действию ветра (длина „разгона* волны), *км.*

Для *D* > 30 *км* эта формула упрощается:

= 0,032/VD.

Авторами справочника предложена следующая формула, которая дает практически те же результаты:

п0,37 1/0,48

(10>

Предполагается, что волна вскатывается по вертикальному или наклонному откосу на высоту от поверхности спокойной воды, равную 1,5 h_w. Для откосов с шероховатой поверхностью, например из каменной наброски, подъем будет равен примерно $l,4/i_w$.

Приливы, нагоны, сейши. Приливные явления почти не заметны на внутренних (водоемах. Максимальный подъем для Больших Озер (Канада) не превышал 2,5 *см.* Однако существенный нагон воды на один берег озера или водохранилища может иметь место, в особенности при малых глубинах. Для больших глубин и малых площадей этот эффект незначителен. Для длинных неглубоких водохранилищ необходимы специальные исследования. Для подсчета величины нагона лучше всего может быть использована формула, выведенная для Зюйдерзее [Л. 5]:

S = W^COS ' <И)

где S — нагон над уровнем водохранилища, *М‘,*
V — скорость ветра, *км)*'*,
D — длина „разгона*⁴ волны, *км*
А— средняя глубина воды, *м*
р — угол между ветром и линией нагона.

Нагон должен всегда добавляться к расчетному уровню при паводке.

В некоторых случаях в водохранилищах наблюдаются периодические колебания уровня, называемые сейшами. Сейши могут возникнуть в результате действия перемежающегося ветра, изменения атмосферного давления, землетрясения или непостоянного притока и оттока. Сейши (появляются и исчезают регулярно с периодом, (меняющимся от нескольких (минут до нескольких часов. После устранения причины колебания они постепенно затухают. На малых водохранилищах амплитуда колебания может достигать 15 *см.* Подъем уровня при сейшах не поддается расчету.

Сейсмические силы. В районах, подверженных землетрясениям, при действии сейсма в плотине возникают инерционные силы. Разрушения плотины не произойдет, если смещения основания будут сопровождаться таким же смещением плотины. Для того чтобы осуществить такое смещение, сейсмические силы должны превзойти инерцию сооружения. Величина этих усилий определяется предварительно по силе землетрясения и степени его воздействия на массу (сооружения. Резонансный эффект, который должен быть учтен при расчете на сейсмические силы гражданских сооружений, для массивных бетонных плотин может не приниматься во внимание.

Плотины хорошо сопротивляются воздействию землетрясения, однако нужно отметить, что сейсмические силы уменьшают коэффициент устойчивости, почему такой расчет и должен быть обязательно проделан для сейсмических районов.

При расчете плотин сейсмические силы комбинируются с другими силами, действующими на плотину. Вследствие их малой длительности и редкой повторяемости может быть допущено некоторое уменьшение коэффициента запаса, исходя из малой вероятности совпадения действия землетрясения и невыгодной комбинации других сил. Так, например, для водосливных плотин маловероятно совпадение максимального паводка и землетрясения.

Величина инерционных сил зависит от ускорения, т. е. от степени изменения скорости движения. Это ускорение обычно берется в виде части от ускорения силы тяжести, а именно: $x=kg$.

Наибольшее число плотин, построенных в сейсмических районах Соединенных Штатов, рассчитано^ на ускорение, равное одной десятой силы тяжести. Стандартными могут считаться значения k=0,1 для аллювиальных оснований и /г = 0,05 для плотной скалы. Для местностей, по которым имеются данные о фактических разрушениях, могут быть приняты и большие значения. При проектировании должны быть тщательно учтены местные условия и в особенности' сейсмичность района. Для ответственных сооружений должны быть проведены специальные геологические исследования.

Инерционная сила, которая создает ускорение заданной массе, например телу плотины, находится из уравнения

$$P_c = \frac{G}{g} x = \frac{G}{g} kg = kG, \quad (12)$$

где P_c — горизонтальная сейсмическая сила, *m*

M — масса плотины (или ее секции);

т — ускорение землетрясения, *MjceK*^{2}\

k — коэффициент соотношения между х и

G — вес плотины (или ее секции), *т.*

Горизонтальная сила предполагается действующей в центре тяжести плотины или ее части, направленной в сторону нижнего бьефа для случая наполненного водохранилища и в сторону верхнего бьефа при пустом водохранилище. Инерция воды в водохранилище также создает силу, действующую на плотину, расчет которой довольно сложен (Л. 6].

Увеличенное давление воды на вертикальную грань плотины, обусловленное сейсмикой, может быть представлено линией *3—4—5—2* на рис. 13. Действительное выражение для кривой *3—4—5* очень сложно, но с достаточной для практики точностью могут быть приняты эллипс или парабола.

Интенсивность сейсмической силы на любой глубине *у* подсчитывается по формуле

р$_с$ = С$_с$Ы$_2$я, (13)

а для полной силы, действующей на плотину со стороны водохранилища,

где *р*— дополнительное от . сейсмики удельное давление воды, *т,1м*^{2}'>

P_c — дополнительное полное сейсмическое давление воды, *т;*

C_c — фактор, зависящий от физических условий, высоты плотины и периода землетрясения;

h_2 — глубина воды перед плотиной, *м.*

Сила *Р* расположена на расстоянии *x*=-^*h*$_{t>2}$ 5 от основания плотины, и ее момент относительно точки *2* равен:

$^{P}e^{X}$=T5^{C}c^{kh}l^- (15>

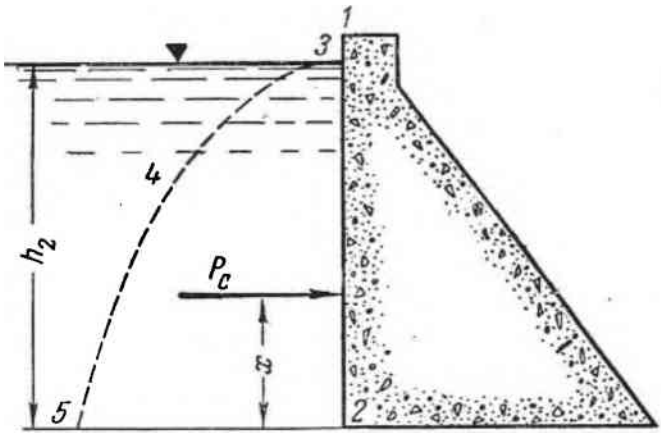


Рис. 13. Действие сейсмических сил на плотину.

Для предварительных расчетов значение С$_с$ может быть принято равным 52 для плотин высотой до 60 *м* и порядка 61 для плотин высотой 60—150 *м.* Нет ясности в определении силы, вызнанной землетрясением, действующей на воду, переливающуюся через водослив во время паводка. Перелив воды через гребень плотины несколько уменьшает воздействие сейсмической силы. Полная сила и момент для таких случаев могут быть приняты по аналогии с данными, вычисленными для глухих плотин:

*	% силы	% момента
1,о	0	0
0,8	29	8
0,6	53	26
0,4	74	53
0,2	98	80
0,0	100	100

* /11 и h_2 берется по рис.. 10.

Уравнения (14) и (15) предполагают, что верховая грань вертикальна и нормальна к направлению сейсмического движения. Давление на наклонную грань может быть принято нормальным к этой грани, что явится наиболее невыгодным случаем. Давление может быть разложено на горизонтальную и вертикальную составляющие.

Горизонтальная составляющая:

<16)

Pc^{X}=Г$_{5}$^{C}M- <17>

Вертикальная составляющая

$$P_c x = 4c X2^?> \quad (19)$$

где <р — угол наклона напорной грани плотины к вертикали.

Нет никаких данных относительно влияния землетрясения на давление ледяного покрова и наносов. Следует полагать, что ввиду краткости воздействия землетрясения отложения наносов будут ‘препятствовать внезапному приложению полного напора. Однако можно предполагать и образование некоторого вакуума, который увеличит устойчивость плотины.

2. ТРЕБОВАНИЯ К УСТОЙЧИВОСТИ ПЛОТИНЫ

Разрушение плотины наблюдается в двух формах:

1) путем скольжения по: а) горизонтальному или почти горизонтальному шву над основанием; б) основанию и в) горизонтальной или почти горизонтальной трещине основания;

2) путем опрокидывания по горизонтальному шву, проходящему: а) в пределах профиля плотины; б) по основанию плотины и в) по плоскости, находящейся ниже подошвы плотины.

Прямой причиной скольжения является наличие горизонтальных^ сил, больших, чем совместное действие сопротивления скольжению по основанию и статического трения, вызванного вертикальными силами.

Прямой причиной чистого опрокидывания без влияния какого-либо другого фактора является наличие горизонтальных сил, достаточно больших по сравнению с вертикальными силами, являющимися равнодействующими всех действующих сил. Если равнодействующая приближается к грани плотины, сжимающее усилие резко увеличивается. Поэтому опрокидыванию предшествует сжатие грунта.

В действительности плотина, в которой равнодействующая проходит в пределах подошвы основания, может опрокинуться, если разрушится низовая грань так, что уменьшится длина основания, а равнодействующая выйдет за его пределы. Плотина может начать опрокидываться и в конце концов разрушится при сдвиге.

Если равнодействующая проходит за пределами средней трети, то может возникнуть горизонтальная трещина, которая уменьшит сопротивление сдвигу.

На основании опыта строительства плотин и анализа их разрушения могут быть сформулированы следующие правила для проектирования.

1. Определение положения равнодействующей. Растягивающие напряжения в теле плотины возникают тогда, когда равнодействующая выходит за среднюю треть для прямоугольного основания или когда удельные давления. $p_г$ отрицательны. Удельные вертикальные давления на основание равны:

для верхней грани

$$P_г —Ё- -Г—Г\sim nг,\backslash$$

для низовой грани

$$Pr=T\frac{sir (SW>}{}Г'',$$

где $'LW$— полная вертикальная сила, включая противодавление, но без реакции основания;

F — площадь основания плотины;

e — эксцентрицитет для силы SU7;

I — момент инерции основания относительно центра тяжести;

m' ъm''—расстояния от центра тяжести основания соответственно до низового и верхового концов основания.

Если шов не может воспринимать растягивающих усилий, упругость кладки вызовет небольшое открытие его. Такое открытие недопустимо для напорной стороны при полном водо-

хранилище, так как при этом может возникнуть полное давление по всей площади, не подверженной сжатию, т. е. условия будут более тяжелые, чем раньше. Дополнительное противодавление будет являться результатом перемещения равнодействующей к низовому концу шва.

Растяжение на низовой грани плотины может возникнуть только при пустом водохранилище. Этим растяжением обычно пренебрегают.

Растягивающие напряжения не могут быть допущены ни в одном из швов плотины при любых нагрузках. Для плотин с прямоугольными в плане швами это требование возникает тогда, когда равнодействующая всех сил, включая противодавление, действующая на плотину выше любого горизонтального шва для полного или пустого водохранилища, пересекает шов в средней трети. Для швов неправильной формы как $p_г$ при полном водохранилище, так и $p_г$ при пустом водохранилище не должны давать растяжения.

При анализе напряжений в теле плотины должно быть учтено замечание на стр. 14, а также то обстоятельство, что у гребня водосливной плотины возникают некоторые растягивающие напряжения.

2. Сопротивление сдвигу. Равнодействующая 2Р всех горизонтальных сил, действующих на плотину выше любого горизонтального шва, стремится сдвинуть эту часть плотины по нижней части. Слабыми плоскостями являются горизонтальные строительные швы, включая шов по основанию. Сопротивление сдвигу и трение должны 'быть достаточными для предупреждения сдвига.

Если *f* —'.коэффициент трения материала плотины выше и ниже плоскости шва, то *f%W* представит собой сопротивление сдвигу. При пренебрежении срезыванием условие равновесия записывается в виде

»->«•<{;. <20>

где 6 — угол между вертикалью и равнодействующей; ,

k_c — коэффициент устойчивости на сдвиг.

Правило формулируется следующим образом: тангенс угла наклона между вертикалью и равнодействующей всех сил, включая противодавление, действующих на плотину выше и ниже горизонтальной плоскости, должен быть меньше, чем допустимый коэффициент трения по этой плоскости.

В тщательно сооруженных плотинах на скальном основании при обеспечении шероховатой поверхности по подошве сооружения и в строительных швах коэффициент трения получается вдвое большим, чем при экспериментах на хорошо обработанных образцах из того же материала. Значения коэффициента трения кладки по кладке и кладки по хорошей скале принимаются 0,6—0,75. При хорошем качестве строительных работ значение *f=0,75* не является чрезмерным. Необходимо тщательно проанализировать значение коэффициента при плохой скале или наличии горизонтальных трещин под обработанной поверхностью основания. Такие трещины особенно опасны, если в них содержатся глины или другой неустойчивый материал. В случае необходимости такой слой скалы должен удаляться.

Для массивных плотин, расположенных на гравии, песке или глине, ориентировочные коэффициенты трения могут быть приняты равными 0,50,’ 0,40 и 0,30 соответственно.

При анкеровке плотины к основанию. коэффициент устойчивости увеличивается до 3. Если учитывать в расчете срезывающее усилие, то предыдущее правило можно сформулировать следующим образом: полное сопротивление трения скольжения в любом шве с учетом скалывания шва. должно превосходить с некоторым запасом полную горизонтальную силу над швом для всех условий нагрузки. Это условие записывается в следующем виде:

„ $fW + rs_aA$,
к1

где s_a — удельное сопротивление срезывания материала;

k_v — коэффициент запаса на срезывание с учетом сил трения (обычно равен 5);

A — площадь шва или основания;

г — отношение средней скалывающей силы к максимальной.

Значение *г* может быть принято равным 0,5 для предварительных расчетов. Для s_a могут быть приняты значения 40—100 *кг/см*^{2} для хорошей скалы.

3. Сжимающие усилия. Максимальные напряжения наблюдаются по концам горизонтальных швов, по наклонным плоскостям, нормальным к граням плотины. Они могут быть приближенно определены по следующим формулам:

на низовой грани

’<=%+ tgV(X, + *p\);* *(22)*

на верховой грани

\+ *Pn* (23)

где <p' и <?"— углы между вертикалью и низовой и верховой гранями плотины;

p_v й *Py* ~ полная вертикальная реакция на низовой и верховой гранях;

p'_n й *p'n* — внешнее нормальное давление от воды и наносов.

Удельные сжимающие напряжения в плотине и по основанию не должны превосходить определенных заданных пределов.

Сплошное скальное основание редко бывает совершенно целым. Те или иные трещины или зоны разрушения могут наблюдаться по всей поверхности основания. Испытание в. целом скального основания невозможно, а измерение на малых площадях не показательно, поэтому лабораторные испытания образцов породы должны сопровождаться внимательным анализом всего основания.

< **4. Растяжение на внутренних плоскостях.** Плотина рассчитывается и проектируется таким образом, чтобы предупредить образование растягивающих напряжений на горизонтальных, наклонных и вертикальных плоскостях. Для плотин, рассчитываемых по приближенному методу, на предварительных стадиях проектирования можно пренебречь растяжением на наклонных и вертикальных плоскостях.

5. Расчетные силы. Все расчетные силы должны быть тщательно определены, а расчетные 'коэффициенты обоснованы с использованием опыта построенных сооружений. Удельные нагрузки, действующие на элементы плотины, должны обеспечивать достаточный коэффициент запаса.

С особой осторожностью подбирается коэффициент устойчивости на скольжение.

При проектировании плотины следует тщательно подбирать ее размеры с тем, чтобы нес фактического профиля отличался не более чем на 1—2% от расчетного.

В расчет действующих сил вводится максимальная глубина воды перед плотиной с учетом волн и сейш.

6. Расчеты и конструкции. Контуры плотины подбираются в соответствии с изложенными выше правилами. Должно быть обращено серьезное внимание на детали проекта, с тем чтобы методы и конструктивные решения обеспечивали при всех условиях устойчивость конструкции.

Все элементы конструкции должны отвечать требованиям, принятым в проекте; кладка должна быть качественной, водонепроницаемой и долговечной. Должны быть приняты меры против разрушения кладки переливающейся водой.

3. БЕТОН ДЛЯ ГРАВИТАЦИОННЫХ ПЛОТИН [Л. 1]

Качество бетона тесно связано с качеством материалов, его образующих; поэтому необходимо проводить тщательные и полные исследования как, материалов для бетона, так и предполагаемых смесей.

Поскольку цемент является наибст лее неустойчивой составной частью

бетона, он имеет влияние на продолжительность жизни бетонных сооружений, в особенности гидротехнических, в условиях переменного климата. Хотя для строительства иногда используются естественные и пуццолановые цементы, большинство плотин построено на портланд-цементе. Американское общество по испытанию материалов предусматривает пять типов портланд-цемента: I—общего назначения; II—среднетермичный; Ш-быстросхватывающийся; IV—низкотермичный; V—сульфатостойкий. Содержание алюмината кальция в этих типах следующее: I—15 %; II—8%; 111—15%; IV—7%, V—5%.

Тип II, обычно известный как модифицированный цемент, широко используется для гидротехнических сооружений, подверженных слабой сульфатной агрессии, или там, где важно получить невысокую температуру гидратации. Тип IV—низкотермичный цемент — применяется для массивных бетонных сооружений, в которых желательно свести к минимуму экзотермию и получить бетон, наиболее трещиноустойчивый. Цемент V типа применяется в специальных условиях при наличии химически агрессивной воды.

Гранулометрический состав песка оказывает большое влияние на прочность и устойчивость бетона и количество цемента в нем. Допустимые пределы крупности фракций зависят от формы и частиц песка. Например, песок с округленными гладкими поверхностями даст более удовлетворительные результаты с крупными частицами, чем искусственно дробленый песок с угловатыми частицами. Модуль крупности песка, который представляет собой сумму процентов частиц, задержанных на стандартных ситах № 4, 8, 16, 30, 50 и 100, разделенную на 100, для обычных условий должен находиться в пределах 2,5—3,0 с отклонением <0,1.

Условной границей, разделяющей крупный заполнитель от мелкого, является прохождение его через сито * № 4, имеющее квадратное отверстие размером 5 *мм* (3/16"). Для массивного бетона принято, что наибольшая крупность камней, допускаемых в бетономешалку, составляет 15 *см*. Для предупреждения нежелательного расслоения бетонной смеси крупный материал должен быть разделен на два — четыре размера, зависящих от максимальной величины камня.

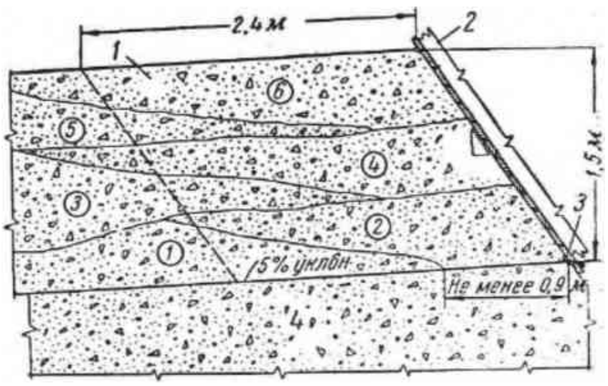


Рис. 14. Последовательность укладки слоев (цифры в кружках) бетона в низовой грани плотины.

1 — защитный слой низовой грани; *2* — опалубка; *3* — заделка шва; *4* — старый бетон.

Применение воздухововлекающих добавок 'повышает долговечность бетона и его удобоукладываемость. Количество и вид этих добавок подбираются экспериментально.

Проектирование бетонных смесей для плотины включает подбор подходящих материалов для получения бетона нужной долговечности, водонепроницаемости и прочности при минимальной стоимости. Теоретические методы подбора смеси, встречающиеся в литературе, используются для подбора пробных смесей, которые приближенно отвечают проектным характеристикам. Состав пробных смесей уточняется для местных заполнителей.

В массивных бетонных плотинах наружные слои (толщиной 1,5 *м)* должны, как правило, содержать больше цемента, чем внутренние. Укладка порций бетона должна чередоваться так, чтобы обеспечивалось тщательное сопряжение слоев свежего бетона со старым. Примерная схема укладки бетона показана на рис. 14.

Для регулирования максимальной температуры в массе бетона желательно укладывать его слоями до 1,5 *м* толщиной. Для многоарочных и контрфорсных плотин высота слоев может быть увеличена до 3 3,5 *м* и более, поскольку отвод тепла от тонких элементов более обеспечен. При.

укладке бетона 'Слоями более 1,5 *м* для массивных сооружений производство работ усложняется передвижением опалубки, поэтому эта толщина слоя может считаться оптимальной. Одной из причин, по которой устройство слоев значительной толщины нежелательно, является накапливание цементного молока на верху слоя, что создает тонкую прослойку с большим водоцементны'м отношением, которая может нарушить связь с последующими слоями.

Очистка поверхности бетона перед укладкой очередного слоя лучше всего осуществляется струей воды или воздуха, если процесс твердения не кончился. -При затвердевшем бетоне очистка лучше всего осуществляется струей мокрого песка, которым очень успешно удаляются все неровности. Независимо от характера обработки поверхности до укладки очередного слоя необходимо немедленно заливать поверхность раствором толщиной 1 — 1,5 *см* до укладки свежей порции бетона, с тем чтобы обеспечить хорошую схватываемость нового бетона с уложенным ранее слоем.

Для предупреждения трещин могут быть осуществлены следующие мероприятия:

1. Укладка бетона на скальное основание или старые бетонные поверхности проводится двумя-тремя слоями толщиной порядка 75 *см* с пятидневным перерывом между укладками слоев.
2. Высота остальных слоев ограничивается 1,5 *м* с пятидневным перерывом между их укладками.
3. Крупные заполнители увлажняются, и через них продувается сжатый воздух для уменьшения температуры (эта операция на плотине Хиваси снизила температуру инертных на 3°С).
4. Вода, поступающая в замес, охлаждается, или используется лед, если он может быть удобно загружен в бетономешалку.
5. Используются низкотермичные цементы.
6. Применяется малое содержание цемента для внутренних слоев и большое— для наружных.
7. Осуществляется циркуляция холодной воды по трубам, уложенным в каждом слое бетона с момента их покрытия бетоном до тех пор, пока температура бетонной массы не будет снижена до среднегодовой температуры данной местности.
8. Ведется контроль за снятием опалубки с таким расчетом, чтобы не возникало большой разности температур между поверхностью бетона и воздухом.

Водонепроницаемость бетона и его плотность могут быть обеспечены тщательным подбором заполнителей и самих бетонных смесей, а также качественной укладкой бетона и уходом за ним.

Однако наличие строительных швов, усадочных трещин, недостаточно качественная укладка и другие причины приводят к недостаточной водонепроницаемости бетона. В качестве мероприятий, предупреждающих фильтрацию через бетон, могут быть использованы битуминозные покрытия, окраска маслом или смесью масла и каучука, цементная штукатурка и т. п. В европейских условиях чаще всего используется битуминозное покрытие.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

АРОЧНЫЕ И КОНТРФОРСНЫЕ ПЛОТИНЫ[1]

4. АРОЧНЫЕ ПЛОТИНЫ

Арочные плотины разделяются на три типа: одноарочные, многоарочные и арочно-гравитационнЫе. Здесь рассматриваются два типа; третий тип для предварительных расчетов может быть принят гравитационным.

Одноарочные плотины применяются там, где ширина ущелья невелика по отношению к высоте и склоны его сложены из скалы, хорошо сопротивляющейся распору. При благоприятных условиях этот тип требует наименьшего расхода материала и, будучи устойчивым во времени, применяется всюду, где позволяют условия; к сожалению, очень немногие створы могут быть использованы для строительства этих плотин.

Одноарочные плотины рассчитываются или с постоянным радиусом, или с постоянным углом. Для плотин с постоянным радиусом центральный угол—наибольший у верха плотины и наименьший у подошвы. Для плотин с постоянным углом центральный угол неизменен, а радиус уменьшается от гребня к подошве. Плотины с постоянным углом являются наиболее экономичными и поэтому более распространенными.

Методы расчета арочных плотин различны. Так называемый «цилиндрический метод» рассматривает условный цилиндр того же радиуса, что и плотина. Напряжение в арке при этом методе может быть получено по котельной формуле^

$$_{0=}1|£, \quad (24)$$

где у — удельный вес воды, *кг\м*
h — глубина воды, *м;*
г — радиус осевой линии арки, *м*
t — толщина арки, *м.*

Этот метод ©виду его условности имеет ограниченное применение. Наиболее употребительным является «метод упругой арки». Давление воды воспринимается арочной плотиной двоякогоризонтальными арками, передающими нагрузку на опоры, и вертикальными стенками, передающими нагрузку на основание.

Распределение нагрузки между арками и стенками 'определяется подбором. При использовании «метода упругой арки» в приведенном ниже примере не учитывается работа вертикальных стенок. При этом также не учитываются факторы усадки бетона, его пластичность, набухание и податливость опор, но рассматриваются усилия от нагрузки и изменения температуры.

Недоучет работы вертикальных стенок создает некоторый запас для нижней части плотины и увеличивает напряжения для верхней. Этот недостаток компенсируется утолщением верхней части арки. Очень успешным оказалось использование горизонтальных швов, расположенных у подошвы плотины, которые снимают горизонтальные усилия. В качестве расчетных сжимающих напряжений принимаются напряжения, равные 25%' 28-дневной прочности бетона, но не превышающие 60 *кг!см*^{2}\ для предварительных расчетов можно принимать 22 $_t$*о* 28-дневной прочности, но не свыше 50 *кг/см*^{2} для несимметричных арок.,

В примере (п. 5) использованы уравнения, данные Кайном [Л. 7], для защемленных на концах арок. Максимальное сжимающее усилие в горизонтальной арке с постоянной толщиной достигается на внутренней стороне у опоры, поэтому для арки с переменной толщиной, меньшей в ключе и большей у опо!р, решение получается более экономичным. Для упрощения расчетов при предварительном проектировании предполагается, что расчет ведется по горизонтальным сечениям, представляющим собой арки с постоянной толщиной, и критерием для расчета служит напряжение на внутренних гранях у опоры.

На рис. 15 [Л. 8, 9] показано отношение *R* максимального сжимающего

[1] Глава оригинала дана в сокращенном переводе. Р е д.

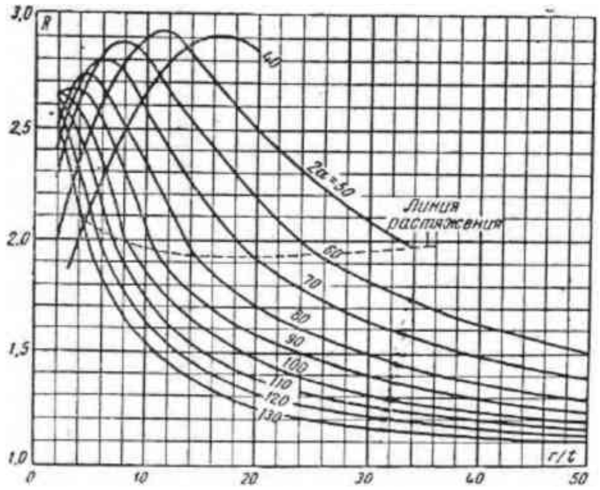


Рис. 15. График коэффициента для пересчета напряжений в пятах (без учета растягивающих напряжений).

напряжения в пяте арки полученного по методу упругой арки, к усилию, найденному по формуле (24), т. е. по цилиндрическому методу.

Можно заметить, что для отношения *r/t=lQ* и при .центральном угле 2a=ǀ100° напряжение, рассчитанное по методу упругой арки, в 1,85 раза больше, чем найденное по цилиндрическому методу.

Максимальное сжимающее усилие в арке можно получить, умножая напряжение, вычисленное по уравнению
(24), на

$$q_i. = {}_{=oy?==}1^{\wedge}, \qquad (25)$$

или

$$\frac{__\ ihrR}{\sim a_i}, \qquad (26)$$

где *R* должно быть взято по рис. 15.

Метод «цилиндра», несмотря на его явную неточность из-за пренебрежения упругими свойствами арки и температурными деформациями, применяется для расчета невысоких плотин. Однако данные расчета весьма приближенны, поэтому этим методом можно пользоваться лишь для прикидочных подсчетов.

Для окончательного расчета ответственных плотин, в особенности расположенных в несимметричных створах, может быть использован метод пробных нагрузок. Этот метод учитывает 'все условия, влияющие на напряжения в плотине. В любой точке поверхности плотины перемещение горизонтальной арки должно в точности равняться перемещению вертикальной стенки. При наличии одного нагруженного кольца арки и одной полностью нагруженной стенки можно было бы легко найти искомое напряжение. Однако эти соотношения, полученные для одной точки, должны быть увязаны с характеристиками других точек, находящихся в непосредственной близости от расчетной. Ввиду сложного взаимодействия всех элементов арочной плотины решение можно получить только путем приближения, задаваясь различным распределением нагрузки между арками и стенками. Расчет сложен и использовался государственными проектными организациями США только в исключительных случаях.

Джоргенсен показал, что при использовании «цилиндрического метода» теоретически наиболее экономичным центральным углом арочной плотины является угол 133°34ᶻ для любых комбинаций пролета, нагрузки и допустимых напряжений; при использовании же метода упругой арки расчетный угол получается несколько большим. Оптимальный центральный угол зависит от топографии местности. Очень мало арочных плотин построено с постоянным углом больше 110°; обычно угол не превышал 100°. При проектировании должен быть выбран наибольший возможный угол по условиям местности [Л. 10].

Минимальная толщина арочной плотины, при которой обеспечиваются напряжения в пределах допускаемых, может быть определена по формуле Гудала [Л. 41]

$$= 1{,}533 r \sqrt[3]{\frac{h}{\left[E\left(\frac{17\,250}{\alpha^2} - 1\right)\right]}} \qquad (27)$$

где *E* — модуль упругости бетона, который можно принять равным 246 000 *кг!см²*

t ■— толщина арки,

г — радиус осевой линии арки, *щ*

h — высота плотины,

а — половина центрального угла, град.

Эта формула предполагает нулевую толщину арочной плотины у гребня. В соответствии с современной

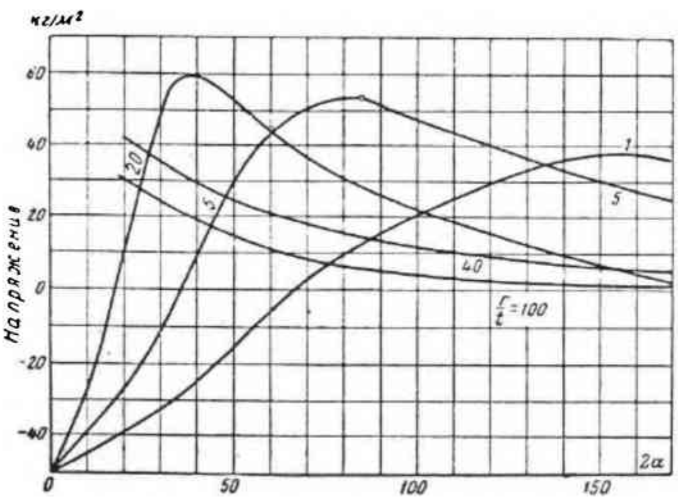


Рис. 16. График пересчета температурных напряжений на внутренней грани пяты (для TC_yE = 13,92).

практикой отношение длины арки к толщине на уровне гребня плотины не должно превышать 60 и на уровне половины высоты плотины — около 20.

Для предварительных расчетов допустимо рассматривать только температурные напряжения, вызванные максимально возможным перепадом температур в бетоне после цементаций вертикальных строительных швов. Если швы заделываются, когда температура плотины равна средней годовой температуре, то падение температуры может быть получено по следующей эмпирической формуле [Л. 12]:

■ °C, (28)

где t — расчетная толщина арки.

Если плотина заканчивается строительством до начала зимы и не вводится в эксплуатацию в течение холодного сезона и заделка вертикальных швов производится перед наполнением водохранилища, температурный перепад будет сведен к минимуму. В этом случае может быть взята половина значения T, подсчитанного по формуле (28). Арочные плотины значительной толщины должны искусственно охлаждаться.

Напряжение от изменения температуры меняется не только с перепадом температур, но также в зависимости от коэффициента теплового расширения $С_т$ и модуля упругости бетона. Для предварительных расчетов могут быть приняты $С_т$ =0,000011 и £ = 232 000 *кг!см*². На рис. 16 сделаны вычисления величины напряжений при этих значениях C_m и E и при значении 7=15,5° С (10°F). Значение *TC^E* в расчете было принято равным 13,92; для других значений *TC^E* величины напряжений, полученные на рис. 16, должны быть умножены на отношение принятой величины *TC^E* к 13,92. Данные графика были получены в предположении, что бетон воспринимает растягивающие напряжения.

Примеры построения арки с постоянным углом даны на рис. 17—19.

Приблизительное расположение равнодействующей в пяте арки может быть получено по графикам рис. 20, 21 и 22.

Влияние сейсмических сил на арочные плотины неясно. Наихудший эффект получается, когда сейсм действует по направлению хорды арки.

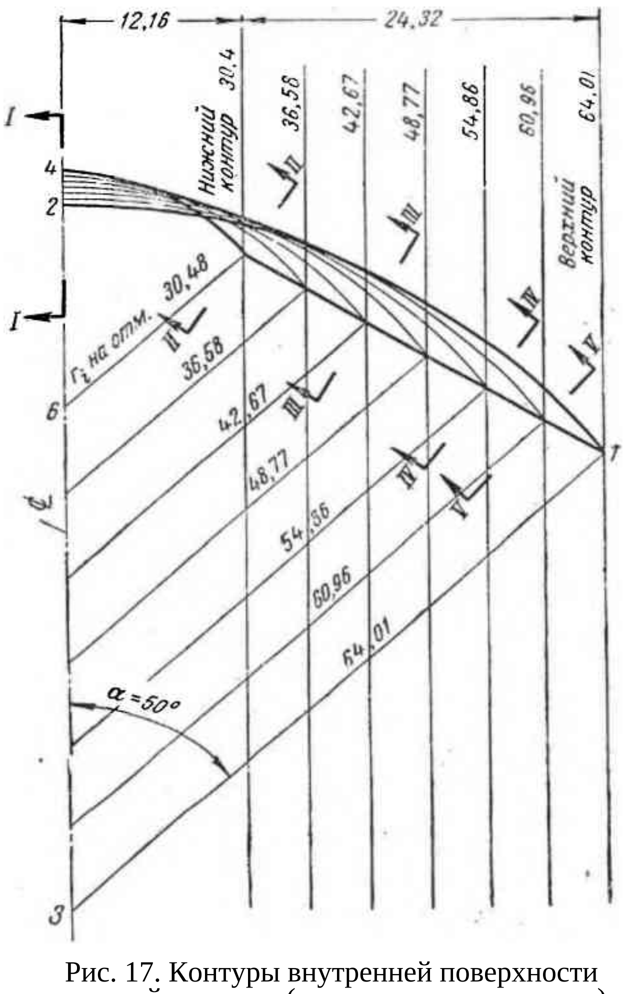


Рис. 17. Контуры внутренней поверхности арочной плотины (для расчетного примера).

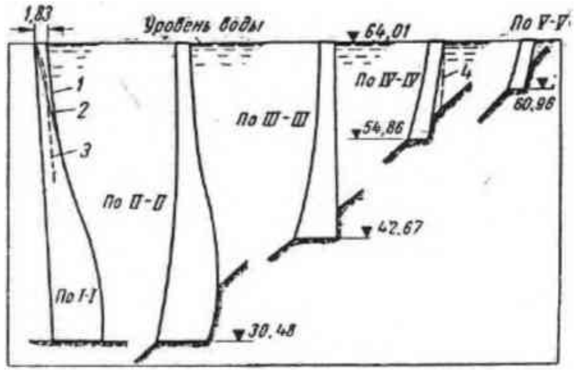


Рис. 18. К расчетному примеру арки.
J — практический профиль; *2* — теоретическое сечение; *3* — по критерию устойчивости; *4* — утолщение.

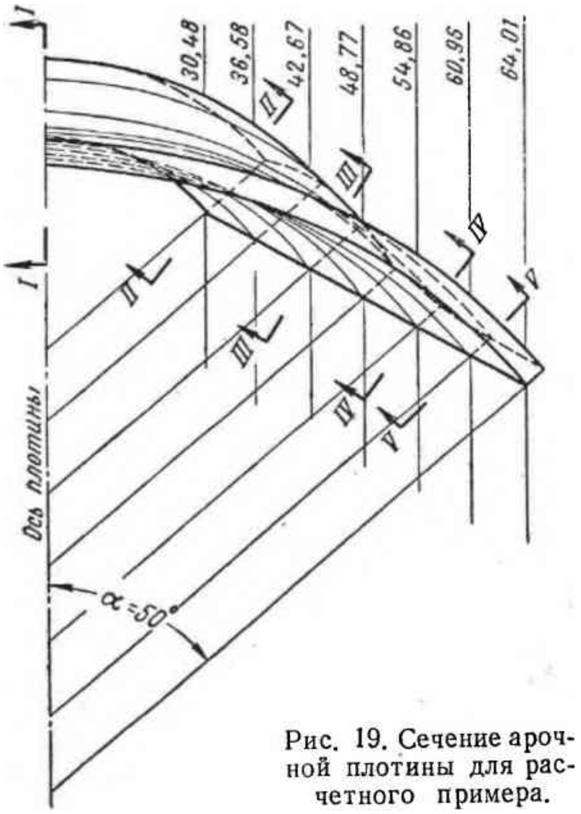


Рис. 19. Сечение арочной плотины для расчетного примера.

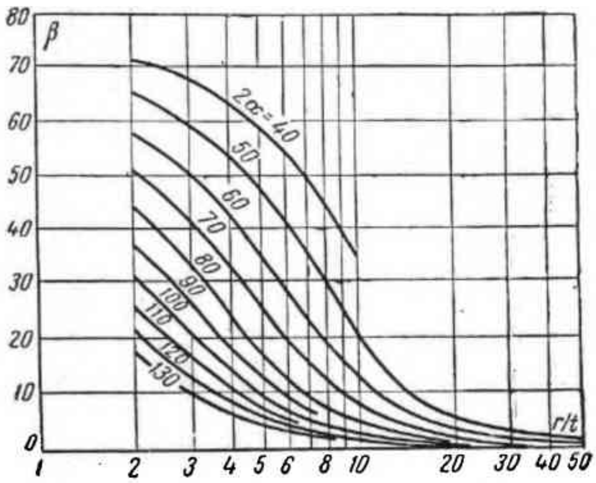


Рис. 22. График для определения направления реакции в опоре (по рис. 20).

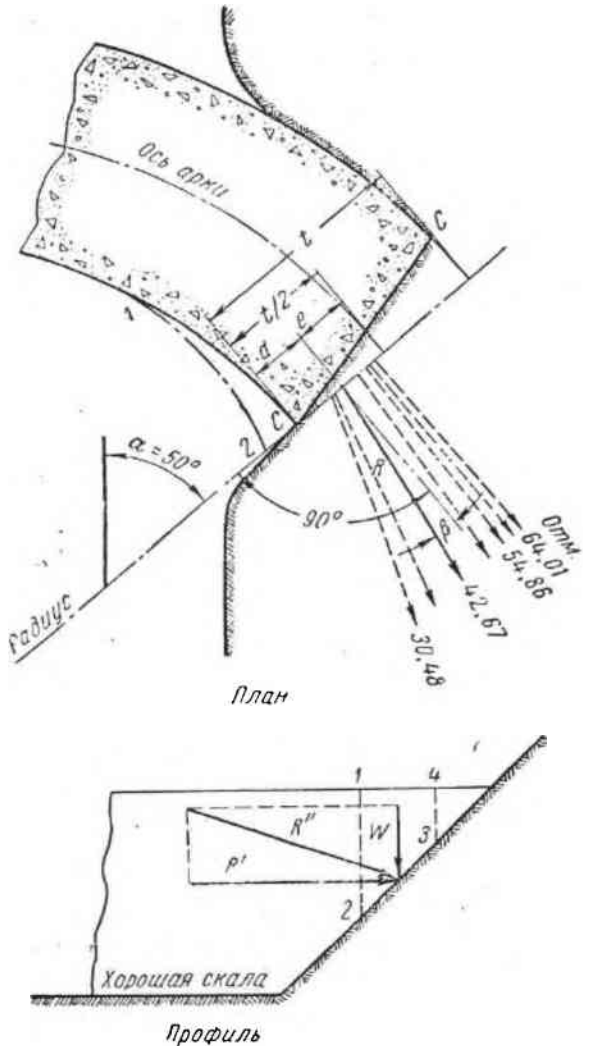


Рис. 20. Условия опирания арки (пунктиром показаны крайние положения равнодействующей).

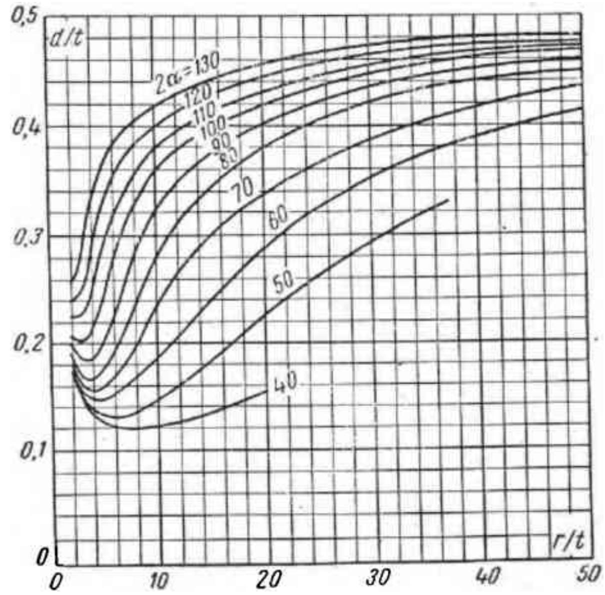


Рис. 21. График для определения расположения горизонтальной равнодействующей в опоре (по рис. 20).

При этих условиях инерция массы арки должна быть учтена в расчете.

Арочные плотины должны воспринимать давление льда, которое действует радиально и может быть воспринято участком арки условно равным по высоте сумме удвоенной толщины арки и толщины льда.

5. ПРИМЕР РАСЧЕТА АРОЧНОЙ ПЛОТИНЫ

На рис. 17 и 18 показаны план и профиль плотины. Требуется запроектировать арочную плотину при следующих предположениях:

p' — прочность бетона на 28-й день, 220 *kz)cm²*

P — максимальное допустимое сжимающее усилие; принимается для предварительных расчетов равным 22°/$_0$ от 220 *KzjcM²*-,

T — объемный вес воды;

2a —центральный угол, равный 100°;

E — модуль упругости бетона, равный 246 000 *kz/cm²;*

T — температурный перепад, равный 5,5° С;

$C_т$ — коэффициент теплового расширения, равный 0,000011.

Радиус внутренней грани арки на любой отметке определяется по формуле

2sina (29)

где b_t— ширина на искомой отметке.

1. Вычисляются требуемые толщины и радиусы арки на нескольких отметках, как показано в табл. 2. Подбором находится такое значение *t* (5-я строка табл. 2), при которой значение *P* (12-я строка табл. 2) было бы равно 50 *кг!см²*.

2. На рис, 17 вычерчивается из центра в точке *3* арка *1—2*, представляющая собой теоретическую нулевую толщину плотины поверху.

3. Чтобы избежать чрезмерного нависания профиля плотины в сторону верхнего бьефа близ опор, принимается нависание плотины 2,3 *м* (что составляет примерно 6,3% высоты плотины) в сторону нижнего бьефа в ключевом сечении. Если этого нависания недостаточно, то вычисление повторяют для большего нависания. В некоторых случаях нависание в сторону нижнего бьефа может быть доведено до 16% высоты плотины. Нависание 2,3 *м* откладывается как расстояние *2—4.*

5. Расстояние между точками *6* и *3* делится на равные интервалы, определяющие центры арок для каждой расчетной отметки по табл. 2.

6. Вычерчиваются внутренние грани арки для каждой отметки.

7. Берутся сечения, как показано на 'рис. 17, и вычерчивается очертание низовой грани плотины, как показано на рис. 18.

8. На сечении *I—I* рис. 18 вычерчивается требуемая теоретическая толщина арок, определяемая допускаемыми напряжениями по табл. 2.

9. Из уравнения (27) определяет-

Таблица 2

1. Отметки	30,40	36,48	42,56	48,64	54,72	60,08	66,88
2. *h*	36,48	30,40	24,32	18,24	12,16	6,08	0
3. L	24,32	32,44	40,52	48,64	56,76	64,84	72,96
4. r_t	15,87	21,19	26,45	31,71	37,03	60,50	47,61
5. Принятое *t*	6,44	6,57	5,84	2,74	1,46	0,61	0
6. Г = Г; *t/r*	19,09	24,47	29,37	33,08	37,76	42,56	47,61
7. $^r{}_e — r_t$ 4- *t*	22,31	27,76	32,28	34,44	38,49	42,86	47,61
8. *r!t*	2,96	3,72	5,03	12,10	25,80	70,50	
9. *R*	0,80	0,79	0,75	0,53	0,42	0,33	
10. *Pi*	39,79	39,44	39,44	47,22	51,91	56,26	0‘
11. p_t	18,79	19,14	11,31	6,09	2,32	2,32	
12. P = $_Л$4-Л	58,58	58,58	58,58	58,58	58,58	58,58	0

ся толщина, обеспечивающая устойчивость арок на продольный изгиб:

г I/ h

t—yr- (3°)

Вычисления сведены в табл. 3. Эти толщины нанесены на рис. 18 пунктирными линиями.

Таблица 3

Отметка	30,40	36,48	42,56	48,64
h	36,48	30,40	24,32	18,24
Га	3,32	3,12	2,90	2,63
r_i	15,87	21,19	26,45	31,71
t	0,73	0,92	1,06	1,16
$г$	16,23	21,65	26,96	32,29
$t_{расч}$	0,73	’ 0,92	1,06	1,16

10. Необходимые толщины арок, удовлетворяющие условиям допустимых гибкостей, определяются в соот-. ветствии с рекомендациями на стр. 25. По верху плотины длина арки составляет 83,2 *м* и допустимая толщина 83,2:60 = 1,39 *м*. На практике ширину служебных мостиков обычно принимают равной 1,8 *м*. Это и нанесено на сечении *I—I* на рис. 18. Аналогично этому длина арки на половине высоты плотины на отметке 48,64 *м* равна 55,5 *м*, и требуемая толщина на этой отметке должна быть равна 55,5:20 = 2,78 *м*. Поскольку теоретическая толщина равна 3,35 ж, никаких уточнений не требуется. Следует отметить, что толщина, обеспечивающая продольную устойчивость, не является определяющим условием для рассматриваемого случая.

11. На сечении *I—I* на рис. 18 вычерчивается огибающий «практический профиль».

12. Практический профиль^ используется для вычерчивания остальных сечений на рис. 17. В данном случае верховое нависание в области сечения *IV—VI* чрезмерно. Существуют три приема для устранения этого:

а) увеличение низового уклона в сечении *I*—Z;

б) утолщение нижней части сечения;

в) увеличение радиуса арок, что приведет к увеличенной толщине арочного кольца на отметках, расположенных ниже влияния практического профиля.

13. По рис. 17 и 18 вычерчивается окончательный план плотины, как показано на рис. 19.

6. КОНТРФОРСНЫЕ ПЛОТИНЫ

Контрфорсные плотины возводятся на хороших скальных основаниях высотой свыше 30 *м*. Контрфорсные плотины на неплотных основаниях должны быть низкими; расчет их неопределенен, поскольку неоднородная осадка основания может привести к напряжению, которое нельзя определить расчетом.

Вследствие значительного наклона напорной грани вертикальная составляющая Давления воды существенно увеличивает устойчивость плотины, в связи с чем для плотин этого типа требуется меньше бетона, чем для массивной плотины; кроме того, взвешивающее давление по основанию контрфорсов существенно меньше, чем для массивных плотин.

Наиболее легкий тип контрфорсной плотины обычно требует не свыше 30—40% бетона, необходимого для массивной плотины. С другой стороны, контрфорсная • плотина требует большего расхода цемента на кубометр бетона, более дорогой опалубки и больших расходов по укладке бетона, не говоря уже о том, что плотина должна быть армирована. Для строительства плотины требуется более высокая квалификация рабочей силы. Затраты на рабочую силу настолько велики в условиях США по сравнению со стоимостью материалов, что контрфорсные плотины перестали в значительной мере быть экономичными, даже в тех случаях, когда стоимость цемента высока, а количество строительных материалов невелико.

Отмечено несколько неудачных случаев возведения контрфорсных плотин в суровых климатических условиях. Относительно тонкие плиты напорной грани или арки впитывают воду, и в некоторых случаях бетон быстро дезинтегрируется. Разработаны некоторые приемы, исключающие эти недостатки, как, например, гидроизоляция напорной грани или исполь-

зование защитных щитов с низовой стороны для обогрева поверхности плотины; тем не менее, влияние промерзания настолько значительно, что строительство этих плотин в суровом климате или на больших высотах в южных широтах не может быть рекомендовано. Эти недостатки, однако, не имеют места для массивно-контрфорсных плотин, поскольку оголовки контрфорсов не промерзают.

Общая теория расчета для плотин облегченного типа такая же, как и для гравитационных. Однако при проектировании контрфорсной плотины проведение экономических расчетов затруднено, поскольку форма контрфорсов, толщина перекрытия и тип его, а также некоторые детали разрабатываются конструктивно.

В контрфорсных плотинах, расположенных на слабом основании, применяются фундаментные балки, уменьшающие удельную нагрузку на грунт. Эти плотины подвержены действию противодавления, как и массивные плотины. Для плотин на скале, не требующих устройства понура, противодавление может быть пренебрежимо мало, хотя для трещиноватой скалы желательно дренирование основания.

При проницаемом основании выемка под зуб с верховой стороны должна быть доведена до водонепроницаемого слоя, а если это невозможно, то фундаментная плита должна быть рассчитана на противодавление и должна быть такой длины, чтобы получить требуемый путь фильтрации.

Верховая грань на многих существующих плотинах имеет угол наклона порядка 45°; в некоторых случаях этот угол увеличен до 55°.

На рис. 23 и 24 показаны характерные детали плотины с плоским перекрытием. Округленная внутренняя поверхность перекрытия в настоящее время почти не применяется. Неразрезное перекрытие, показанное на рис. 24,6, неприменимо при неоднородной осадке фундамента. На рис. 24,в показаны контрфорсы ю округленными оголовками. Очертание оголовка принимается таким, чтобы давление воды было направлено по его радиусу. В некоторых случаях оголовки не армируются, хотя вопрос решается специальным расчетом.

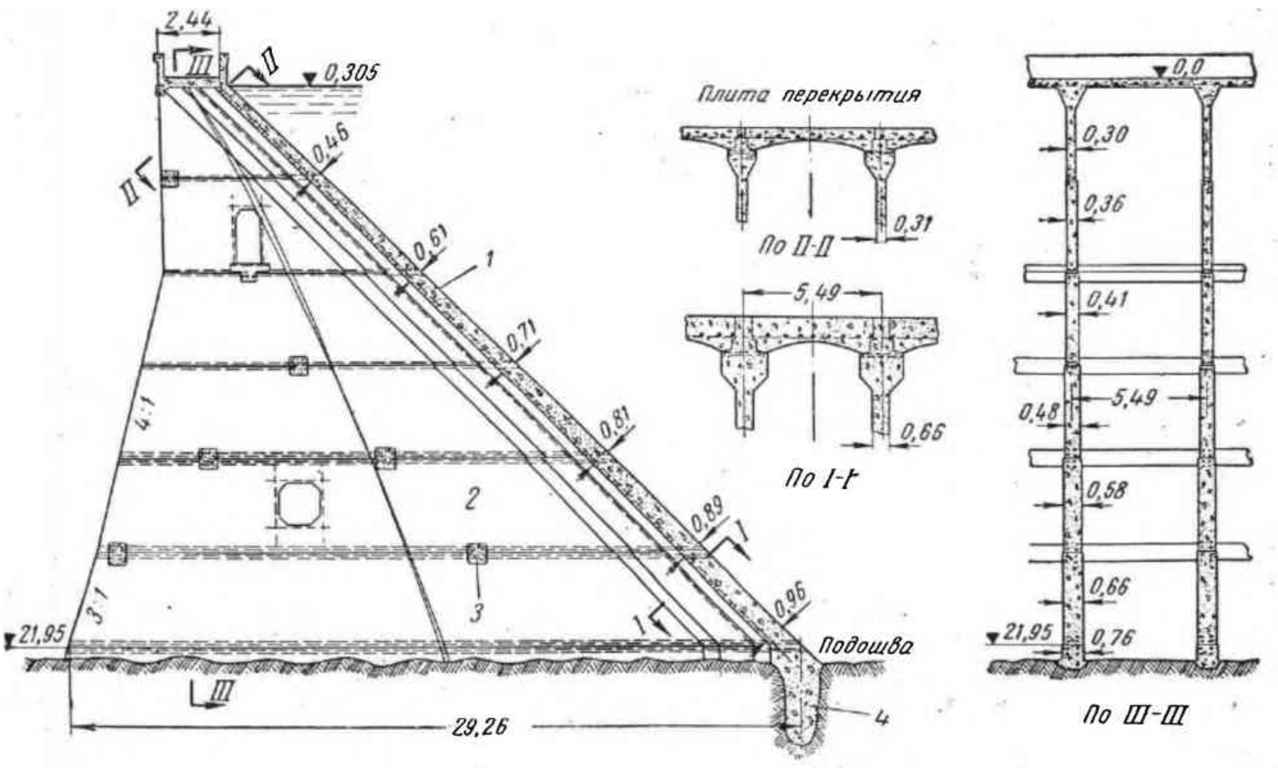


Рис. 23. Пример контрфорсной плотины.
1 — плита; *2* — контрфорс; *3* — балка; *4* — зуб.

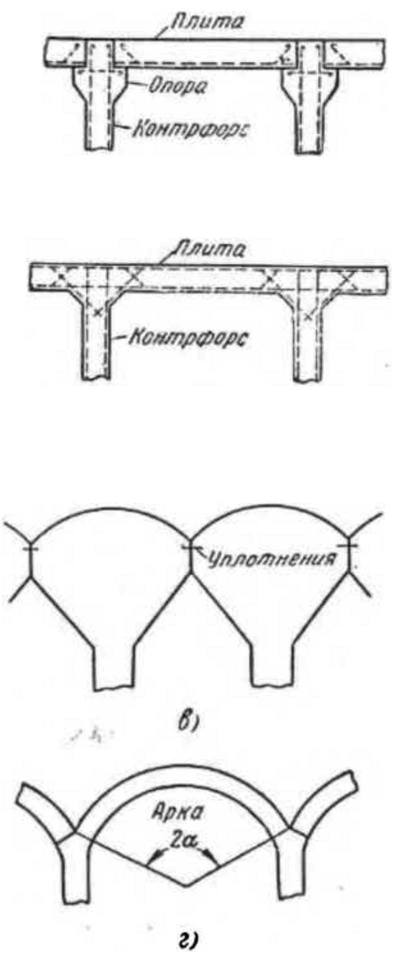


Рис. 24. Типы контрфорсных плотин.

На рис. 24,г показан многоарочный тип плотин. Нагрузка воды воспринимается несколькими цилиндрическими арками, перекрывающими пролет между контрфорсами. Этот тип перекрытия должен быть рассчитан по теории упругой арки, учитывая, что сечения плотины даны нормально к образующим арок. Нагрузка будет меньшей в замках арок, .чем в пятах. Это очень важное обстоятельство, в особенности для высоких плотин. Центральный угол таких арок меняется от 100 до 180°.

Расчет контрфорсов производится по правилам расчета массивных плотин. В дополнение к основному расчету контрфорсы проверяются расчетом как несущие стенки. Определение пролетов, толщин перекрытия и других элементов плотины производится пробным путем с последующим испытанием модели плотины. В некоторых случаях может потребоваться изменение длины контрфорса, что достигается путем уменьшения верхового откоса для увеличения вертикальной составляющей воды. Если потребуется дополнительное увеличение веса плотины, то лучше всего увеличивать наклон напорной грани.

При плоских перекрытиях контрфорсы располагаются на расстоянии 4,5—7,5 *м.* Пролеты арочных перекрытий весьма различны и меняются от 10 до 20 *м.* В большинстве случаев наиболее экономичный пролет пере-

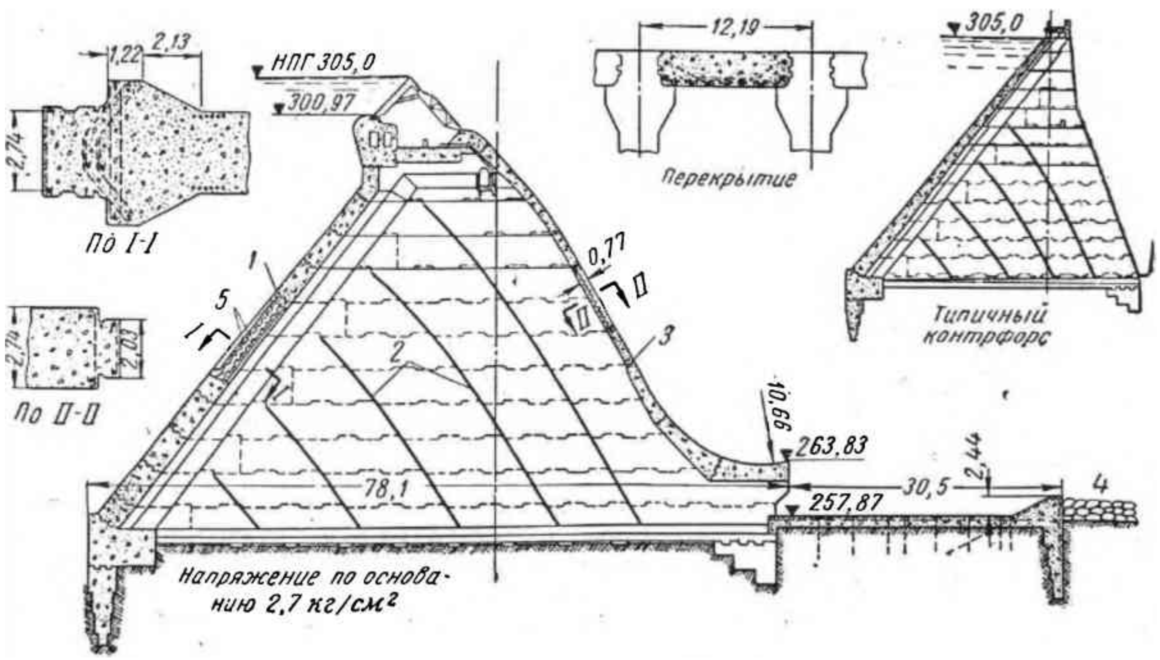


Рис. 25. Плотина Поссум Кингдом.

оасширенные швы верховой грани; *2* — строительные швы; *3* — расширенные швы низовой грани; *4* — тяжелая р н наброска; *Б* — углубления 0,15 *м.*

крытия возрастает с увеличением высоты плотины.

При больших пролетах многоарочной плотины контрфорсы делаются полыми. В тех случаях, когда контрфорсы выполнялись без армировки, в них появлялись настолько серьезные трещины, что требовалась существенная реконструкция.

В контрфорсах часто возникают усадочные трещины; они обычно располагаются по направлению главных напряжений по диагонали от основания к перекрытию. На плотине Поссум Кингдом строительные швы были выполнены, как показано на рис. 25, для того, чтобы оказать влияние на направление трещин.

Контрфорсы представляют собой по существу сильно нагруженные тонкие стенки. В местах, где напряжения значительны, свободная длина не должна превышать 10 толщин; там, где напряжение составляет примерно 50% от допустимых/это отношение может быть увеличено до 15. Свободная длина уменьшается устройством распорных балок или пилястров.

Для прохода людей и переноски материалов в контрфорсах устраиваются отверстия; в некоторых случаях может быть проложена инспекторская галерея.

На мягких грунтах контрфорсы могут быть расположены на сплошном бетонном основании. Давление ветра, которым пренебрегают при расчете массивных плотин, должно учитываться при расчете контрфорсных плотин.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

ЗЕМЛЯНЫЕ И НАБРОСНЫЕ ПЛОТИНЫ[1]

7. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ВОЗВЕДЕНИЕ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

1. Общие условия. Устойчивая земляная плотина может быть запроектирована и возведена практически для любых условий местности и при любом основании с использованием различных грунтовых материалов. При наличии соответствующих материалов земляные плотины могут бйть построены значительно дешевле, чем бетонные гравитационные. Использование земляных плотин, однако, часто ограничивается необходимостью устройства водослива для пропуска паводка. Небезопасно пропускать паводок непосредственно через земляную плотину даже при ее тщательной облицовке, за исключением случаев, очень малых удельных расходов воды на гребне. Поэтому в тех случаях,, когда длина водослива получается значительной, устройство земляной плотины нецелесообразно. Величина-фильтрации через пористый материал тела плотины обратно пропорциональна пути фильтрации, поэтому земляная плотина, имеющая наибольшую длину основания по отношению' к высоте, наиболее пригодна для возведения на проницаемых основаниях.

При тщательном уходе земляная плотина так же долговечна, как и любое другое сооружение. Объем необходимых эксплуатационных мероприятий резко сокращается после того, как заканчивается осадка плотины и тело ее становится плотным, устойчивым и покрытым раститель-

[1] В .перевод включены две главы оригинала, посвященные проектированию и возведению земляных плотин, и глава по набросным плотинам. Исключена глава, в которой излагается метод расчета устойчивости земляных плотин. (Вопросы .расчета земляных плотин подробно разработаны в отечественной литературе, и потому приводимые в оригинале прймеры расчета не дают чего-либо нового. Вместе с тем в (разделе проектирования и строительства даются интересные практические рекомендации, основанные на опыте строительства многих плотин в США и Европе. Представляют также интерес некоторые конструкции деталей плотин, как земляных, так и набросных. Иллюстративный материал взят лишь тот, который связан с практическими рекомендациями или изображает примеры выстроенных сооружений. Более подробно эти вопросы изложены в [Л. 4, 15].

костью. Земляные плотины обладают известным преимуществом в организации ландшафта в тех случаях, когда нежелательно изменять вид местности.

Основанием плотины могут служить различные грунты. Наименьшее беспокойство вызывает слабая скала; аллювиальные отложения создают хорошее основание после их уплотнения весом плотины. Крупный песок и гравий как основание плотины сомнения не вызывают, так как их плотность со временем повышается.

Особой осторожности требуют мелкие однородные пески. Если плотность их меньше критической, то, будучи насыщенными, они под нагрузкой текут, как жидкость, при возникновении какого-либо первоначального возмущения (землетрясения, взрыва, прохода поезда). В таком состоянии устойчивым можно считать несвязный материал, имеющий объемный вес не менее 1 350 хса/ти^3. Основание плотины должно быть уплотнено настолько, чтобы его плотность соответствовала условиям нагрузки.

Наибольшего изучения требует основание из пластичных глин. В некоторых случаях плотине приходится давать исключительно пологие откосы, с тем чтобы напряжение в основании сделать существенно меньшим разрушающего напряжения для данного материала.

Выбор места плотины и характера основания является решающим при строительстве плотины и имеет большее значение, чем экономические соображения.

Земляные плотины возводятся из рыхлых несвязных или слабосцементированных пород гравия, песка различной крупности и глины. Вследствие чрезвычайно больших объемов материала, затрачиваемых на строительство земляной плотины, карьеры этих материалов должны находиться в непосредственной близости от места строительства. Очевидно, что если створ плотины выбран в скалистом ущельи при отсутствии поблизости грунтов, то должно быть отдано цред почтение набросной или бетонной плотине.

Для укатанных земляных плотин следует принять для низовой части песчано-гравелистые грунты и для верховой части более водонепроницаемые. Для намывных и полунамывных плотин хорошими материалами являются песок и гравий с галькой и обломками скалы, а также мелкозернистые наносные грунты. В выбранном материале должно находиться достаточное количество мелких фракций для использования при возведении ядра. Желательно использовать при строительстве как непроницаемые, так и проницаемые материалы, однако целесообразным является устройство плотины целиком из однородного материала.

В интересах экономии проектирование земляной плотины должно вестись из местных материалов с минимальным расходом бетона, глины или мелкозернистых грунтов для создания водонепроницаемых элементов. Ниже приводятся некоторые примеры устройства плотин из различных материалов, однако приведенные данные не должны считаться рекомендациями, пригодными на все случаи, и выбор материалов должен всецело основываться на полевых исследованиях и анализах.

2. Примеры проектирования. На рис. 26 показан рациональный профиль плотины для створа, в котором для строительства можно использовать только песчано-гравелистый грунт. Ближайший водонепроницаемый материал, который может быть получен на расстоянии 20 км, суглинок. Трудности в выемке и транс-



водонещюмицв&мяя ехала

Рис. 26. Проект плотины на песчано-гравелистом основании.

1 — каменная наброска 0,9 *м; 2 — непроницаемо*^ ядро из суглинка; *3* — промытый гравии Objw( ) 4 песчано-гравелистое основание; *5* — тело плотины и песчано- гравилистого грунта.

портировке таковы, что стоимость суглинка значительна, поэтому применение этого материала должно быть ограничено.

В соответствии с этим производится отрывка траншеи с одиночными откосами, доходящей до слабой скалы, расположенной на глубине 15 *м*. Скала расчищается на ширину 4,5 *м* с большой тщательностью, и на расчищенной площадке устраивается ядро из водонепроницаемого суглинка. Оставшееся пространство траншеи заполняется насухо и тщательно уплотняется кулачковыми катками. На ширину 4,5 *м* в середине траншеи укладывается суглинок, а остальной объем заполняется песчано-гравелистым грунтом, который образует естественное основание. Над основанием плотины возводится ядро шириной 4,5 *м* с укаткой слоями толщиной 20 *см;* сама плотина укатывается такими же слоями.

Замена суглинистого ядра железобетонной стенкой толщиной 0,3—1,0 *м* является более экономичным решением, но нежелательна, поскольку суглинистое ядро будет лучше приспосабливаться к любым перемещениям тела плотины и в общем окажется более надежным, чем бетон. Условия дренирования в этой схеме хорошие. Траншея в основании является мощной дреной, в которую входит кривая депрессии из ядра плотины.

На рис. 27 показан проект плотины, применимый для створов, в которых имеются песок с сильной примесью глины и крупный проницаемый песок :в достаточных количествах в карьере непосредственно у створа. Как и на рис. 26, условия устройства дренажа вполне благоприятны и устойчивость сооружения обеспечена. Непроницаемый слой, расположенный на 15 *м* ниже основания плотины, имеет достаточную устойчивость на сдвиг. Выемка в основании для ядра может быть использована для дренажа.

Схема плотины на рис. 28 применима для створа с такими же грунтами, как и в предыдущем случае, но с расположением плотины на непроницаемом основании. Фильтрационная вода, которая пройдет через относительно водонепроницаемую центральную часть плотины, появится' на низовом откосе или у подошвы откоса. Вследствие этого, чтобы избежать опасности оползания низового откоса,, необходимо устройство дренажной призмы, состоящей из щебня, гравия и песка. Фильтрация, как можно судить по схеме, будет незначительной.

В несколько ином виде может быть решена задача на рис. 29, когда при прежних условиях плотина расположена на сильно проницаемом основании, идущем на большую глубину. В этом случае целесообразно устройство глиняного понура, весьма водонепроницаемого по сравнению с песчаным телом плотины, который отходит от непроницаемого ядра и проходит в верхний бьеф на длину, примерно равную 10 или более напо-

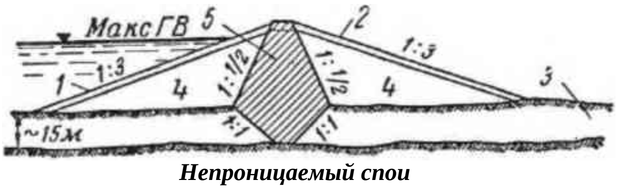


Рис. 27. Схема плотины на суглинистом и крупном песке.

/ — наброска из камня толщиной 0,9 *м*. по слою гравия в 0,3 *м;* 2 — наброска из камня толщиной 0,6 *м* по слою гравия 0,3 *м;* *3* — крупный песок; *4* — крупный песока; 5 — суглинок.



Рис. 28. Вариант плотины на непроницаемом основании.

I —наброска из камня толщиной 0,9 *м* по слою гравия 0,3 *м; 2* — суглинок; *3* — фильтр; *4* — низовой банкет; *5* — крупный песок.

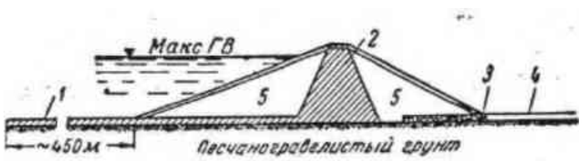


Рис. 29. Схема плотины на песчано-* гравелистом основании.

/ — понур из суглинка; *2* — суглинок; *3*— гравийный фильтр; *4* — дренажная канава; 5—песчано-гравели стый грунт.



Рис. 30. Вариант плотины из суглинка на суглинистом основании.

/ — наброска из камня толщиной 0,9 *м* по слою гравия 0,3 jk; *2* — песчано-гравелистый фильтр; *3* низовой банкет; *4* — суглинок.

рам. Такой понур или защитный тюфяк почти полностью прекращает фильтрацию и резко увеличивает ее путь. При этих условиях основание будет наполнено фильтрационной водой, и для предупреждения выноса грунта в низовую часть в его основании необходимо устройство гравийного фильтра и дренажной канавы.

На рис. 30 показан вариант земляной плотины, предложенный для створа, в котором может быть получен только суглинистый грунт и в котором основание также состоит из неплотных суглинков. Для этого случая заложение верхового откоса сильно увеличивается, чтобы избежать сползания. Пологость обоих откосов определяется также необходимостью распределения нагрузки на основание так, чтобы не превзойти прочности грунта основания. Необходимо отметить, что слой фильтра расположен по основанию у подошвы верхового откоса плотины. Этот фильтрующий слой обеспечивает дренирование малого количества воды и препятствует насыщению низовой грани откоса.

3. Практические рекомендации. Практические рекомендации для проектирования земляных плотин могут быть вкратце сформулированы следующим образом:

1. Не допускается перелив воды через верх плотины.

2. Кривая депрессии не должна выходить на низовой откос.

3. Верховой откос должен быть устойчив при внезапных снижениях уровня.

4. Верховой и низовой откосы должны обладать достаточной ^пологостью, чтобы обеспечить устойчивость плотины с высоким коэффициентом запаса.

5. Уклоны верхового и низового откосов земляной плотины должны быть приняты такими, чтобы касательные напряжения в основании были существенно меньше допускаемых для данного материала при достаточном коэффициенте запаса.

6. Возможность свободного прохода воды от верхового откоса к низовому должна быть исключена.

7. Фильтрационная вода, проходящая через тело и основание плотины и под ней, должна иметь при выходе на поверхность настолько малые давление и скорость, чтобы исключить сдвиг частиц грунта по основанию.

8. Верховой откос должен быть защищен от действия волн, а низовой откос — от действия дождей.

Земляная плотина должна проектироваться с водосливом такой пропускной способности, который защитил бы ее от перелива. В то время как бетонная или каменнонабросная плотина с недостаточным по размерам водосливом может противостоять переливу даже при значительной глубине слоя воды, для земляной плотины перелив означает разрушение. Перелив через плотину из-за недостаточности размера водосброса является наиболее частой причиной аварии с земляными плотинами. На многих земляных плотинах, находящихся в эксплуатации и имеющих водослив недостаточной пропускной способности, (ведутся тщательные наблюдения за паводками.

Превышение гребня плотины над уровнем воды должно представлять собой сумму высот приливных волн, сейш, ветрового нагона и высоты набегания волны на откос плюс некоторый гарантийный запас, устанавливаемый по техническим соображениям.

Практически фильтрация имеет место на всех плотинах, как земляных, так и бетонных, в теле плотины и в основании. Характер материалов, Слагающих основания и берега, имеет решающее значение для определения величины фильтрации. Задачей проектировщиков и строителей являются уменьшение и контролирование фильтрации до безопасных пределов.

В земляной плотине положение кривой депрессии определяет окончательную конструкцию крепления откосов. Для плотины из однородного материала линия фильтрации пересекает низовой откос несколько выше подошвы плотины. Вследствие этого некоторая часть низового откоса становится насыщенной водой и может подвергнуться оползанию в зависимости от высоты такого насыщения и характера крепления. Устройство дренажа несложно и гарантирует откосы плотин от оползания.

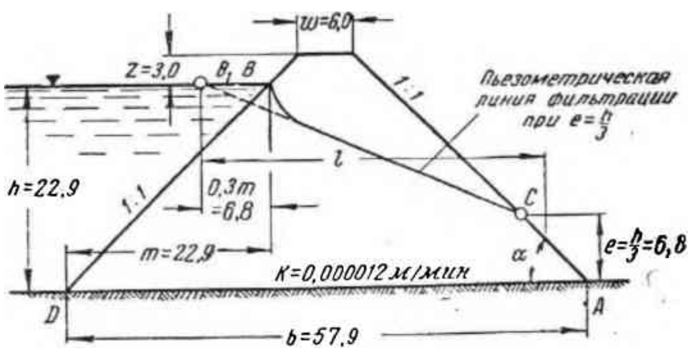


Рис. 31. Определение кривой депрессии.

Для земляных плотин, выполненных из крупных материалов, в которых капиллярность не имеет влияния, кривая депрессии представляет собой по существу кривую насыщения, т. е. наивысшую струйку течения. В этом и других случаях кривая депрессии может быть определена как линия, над которой нет гидростатического давления и под которой имеется гидростатическое давление. Это определение должно быть очень строго разграничено во всех случаях, когда рассматриваются земляные плотины. Если плотина сложена из мелкого грунта с высоким капиллярным поднятием, то насыщение его может иметь место без гидростатического давления.

Положение линии депрессии для земляной плотины из однородных материалов на непроницаемом основании и точка ее пересечения с низовым откосом зависят только от поперечного сечения плотины. Ее положение не зависит от фильтрационных свойств материала плотины, если он однороден.

4. Положение кривой депрессии. При проектировании желательно иметь возможность предсказать положение кривой депрессии в поперечном сечении плотины. Ниже приводится приближенный способ определения этой кривой, достаточный для практических целей. Результаты этого расчета хорошо соответствуют наиболее точным методам.

На рис. 31 плотина состоит из однородного материала на непроницаемом основании; *A* и *D* — точки пересечения соответственно низового и верхового откосов плотины с основанием; *B* — точка пересечения максимального уровня воды в водохранилище с верховым откосом; Bi — точка пересечения продолжения касательной к кривой депрессии с максимальным уровнем воды; *C* — точка пересечения касательной к кривой депрессии с низовым откосом; *m*— горизонтальная проекция смоченного верхового откоса; *h* — вертикальное расстояние от точки *B*\ до точки *A*, равное напору, вызывающему фильтрацию; *e* — вертикальное расстояние от точки *A до* точки C; / — средняя длина пути фильтрации; *b* — длина основания плотины или непроницаемого ядра.

Построение кривой депрессии производится следующим образом:

1. Если проницаемость грунта, уложенного в земляную плотину, одинакова в вертикальном и горизонтальном направлениях, то плотина вычерчивается в неискаженном масштабе. Если горизонтальная проницаемость отличается от вертикальной, то поперечное сечение плотины вычерчивается в искаженном масштабе. Для искажения фактические горизонтальные размеры умножаются на

где k_v — коэффициент фильтрации материала в вертикальном направлении и ^—коэффициент фильтрации этого же материала в горизонтальном направлении. Вертикальные размеры остаются неизмен^ ными.

2. На низовом откосе на высоте *e*— ~ располагается точка C.
O

3. Точка *Bi* намечается на отметке максимального уровня воды в верхнем бьефе на расстоянии, равном 0,3 *m* от точки *B.* Проводится касательная к линии фильтрации—линия *B^.*

4. Приближенно вычерчивается переходная вогнутая кривая, начинающаяся от пересечения уровня воды с верховым откосом (точка *B),* перпендикулярная верховому откосу и касающаяся линии *B\C.* При очень крутом верховом откосе переходная кривая может быть выпуклой.

5. Приближенно вычерчивается слегка выпуклая переходная кривая, касательная как к линии *BC,* так и к низовому откосу.

В сложных плотинах, состоящих из высоконепроницаемого ядра с прослойкой крупного материала, редко приходится определять линию фильтрации для всего поперечного сечения при условии, что положение этой линии для непроницаемого ядра было тщательно определено описанным выше методом. При проведении расчетов необходимо иметь в виду, что расход фильтрации в любом поперечном сечении один и тот же. Если 'положение кривой депрессии в пределах верхового клина необходим, то он может быть изображен в зависимости от коэффициентов фильтрации. Если вместо непроницаемого основания, принятого в предыдущих рассуждениях, под плотиной находится слой проницаемого грунта, то для этих же условий и размеров положение кривой депрессии будет в большинстве случаев идентичным случаю с непроницаемым основанием.

Для всех практических случаев количество фильтруемой воды через плотину может быть грубо подсчитано с точностью, с которой определяется коэффициент фильтрации в действующих плотинах, из следующего выражения [Л. 14]:

$$q\wedge—l * \quad 0,04\&/i^2 \qquad /q\, i\backslash \; W$$

где *q* — расход фильтрации на* единицу длины плотины, *M^zjceK',*

k — коэффициент фильтрации, *м/с ’K*

h — напор, вызывающий фильтрацию,

I — средняя длина пути фильтрации, определяемая из выражения

$$I = (1,13h\ 4\text{-}\ 2г)\ \mathrm{ctg}\ a\ \text{-ф}\ Ь, \qquad (32)$$

где a — внутренний угол, образуемый низовым откосом и горизонтальным основанием;

z—вертикальное расстояние от поверхности воды в верхнем бьефе до верха плотины;

b — ширина плотины поверху, *м.*

Для плотины, показанной на рис. 30, относительно непроницаемой и однородной, является очевидным, что кривая депрессии пересечет низовой откос значительно выше подошвы, чем на рис. 31, если не будет использован какой-либо метод дренирования. На рис. 32 осуществлен дренаж, и линия фильтрации понижается, располагаясь внутри низового клина в дренажном слое.

5. Дренаж низового откоса. На некоторых плотинах устройство дренажа не представляет затруднений, поскольку материал низовой части настолько проницаем, что условия дренирования всегда хороши. Так, в схеме на рис. 28 при наличии проницаемых слоев обеспечивается полное дренирование, но и здесь должно быть обращено внимание на защиту подошвы с помощью банкета. В этом случае вокруг каменного банкета укладывается фильтр из гранулированного материала, который будет связан с остальной частью крепления откоса и основанием. Эта деталь часто остается без внимания, но нужно считать, что целесообразно устраивать горизонтальный фильтрующий слой поверх водонепроницаемого основания, для того чтобы исключить выход кривой депрессии на низовой откос.

На рис. 32 показана плотина, состоящая из однородного материала на непроницаемом основании, но в низовой части ее уложен дренажный

слой или фильтр вдоль основания, который отводит воду в нижний бьеф.

При этих условиях линия фильтрации может быть вычерчена в соответствии с описанными выше принципами. Следует заметить, что низовая часть плотины свободна от насыщения водой. Пропускная способность фильтра должна существенно превышать максимальный расход через плотину. Пропускная способность дренажа может быть подсчитана по формуле Дарси. Если пропускная способность фильтра вдвое меньше расхода фильтрационной воды через плотину, должны быть приняты меры по увеличению проницаемости фильтра путем использования более крупных материалов, труб и пр.

Дренажные трубы используются в земляных плотинах в тех случаях, когда материал плотины является настолько пористым, что можно ожидать больших фильтрационных расходов. Такие трубы укладываются в фильтр из проницаемого материала. Трубы перфорируются, таким образом, чтобы материал фильтра не мог проникнуть в трубу. Некоторые детали укладки дренажных труб на намывной плотине Кингслей показаны на рис. 33.

Для земляных плотин часто представляется необходимым устройство фильтров, для того чтобы предупредить вымывание мелкого материала из крупного. Они должны быть устроены в виде последовательно расположенных слоев материала различной крупности от размера, слегка большего, чем материал плотины, до размера, немного большего, чем отверстие дрен или защитного покрытия откоса.

Число слоев фильтра будет зависеть от изменения размера частиц материала в плотине и величины пустот крупного материала в дренаже или наброске. Во многих случаях требуемые результаты могут быть получены с одним слоем, однако фильтр, выполненный в один слой, может быть недостаточно эффективным и надежным.

Часто применяется слой речного гравия толщиной 45 *см*, в котором

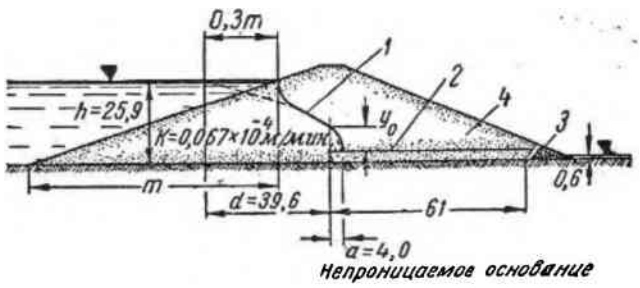


Рис. 32. Влияние дренажа на кривую депрессии.
/ — линия фильтрации; *2* — дренаж или фильтр; *3* — гравий; *4* — песок.

30% частиц крупнее 6 *мм* с постепенным увеличением до 50—70 *мм.* При таком фильтре вынос из него частиц будет ограничен. Если требуется фильтр больше одного слоя, то число их может быть увеличено при толщине слоя 15—30 *см.*

На рис. 34 показан довольно типичный банкет из каменной наброски, защищенный фильтром из слоя песка и слоя гравия. Углубление в непроницаемый слой имело в данном случае свой особый смысл. Слой^непроницаемого материала толщиной около 5 *м* образовал непосредственное основание плотины. Под ним располагался мощный слой крупного песка с гра-

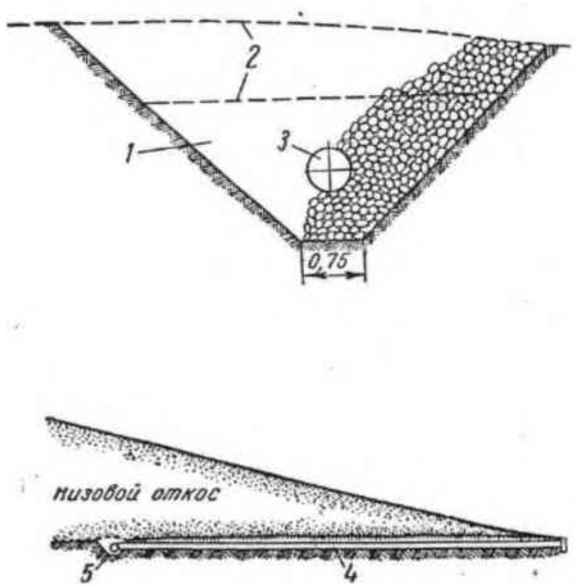


Рис. 33. Схема дренажа на плотине Кингслей.
1 — засыпка гравием; *2* — засыпка речным гравием, 3 — гальванизированная труба; *4* — отводная труоа, *5* — дренаж.

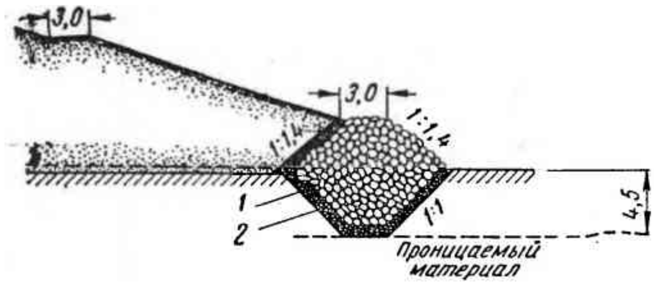


Рис. 34. Типичный банкет из каменной наброски.

/ песчаный фильтр 15 *см; 2* — гравийный фильтр.

вием, находящийся под небольшим гидростатическим давлением. Низовой банкет доходит до проницаемого материала, вследствие чего имеет место значительная фильтрация через банкет, выходящая в старое русло.

Расположение дренажей и фильтров для земляных плотин может быть самым разнообразным и иметь свои преимущества и недостатки. Для обычных условий наилучшим дренажем является мощный банкет из каменной наброски на 25—35% высоты плотины с выкладкой хорошего фильтра. Если значительное гидростатическое давление действует непосредственно у подошвы плотины, оно может быть уменьшено расположением дренажа и фильтра выше по течению, с тем чтобы получить некоторую пригрузку над ним, однако в этом случае фильтрация увеличивается вследствие уменьшения путей фильтрации.

Если дренаж расположен по оси плотины, то увеличивается фильтрация, но зато повышается устойчивость плотины. Во многих случаях целесообразно устройство фильтра, расположенного в пределах средней трети расстояния от оси плотины до подошвы низового откоса.

Для уменьшения фильтрации через тело плотины прибегают к устройству ядра. Ядро обычно отсыпается из сравнительно непроницаемого грунта, что предпочтительнее бетонных и металлических диафрагм. Однако во многих случаях ядро может быть выполнено из бетона или шпунта там, где нет подходящих местных материалов.

Полное насыщение мелкого несвязного материала плотины водой и его высокая подвижность возможны при условии, что действующие градиенты будут больше «критического» значения, определяемого по формуле Гарца [Л. 15]:

г7=г==(1 — *pM*,— 0- (33)

где — критический градиент взвешивания;

h — разность напоров;

L— длина пути фильтрации, *м;*

p —■ пористость;

4_S — удельный вес грунта.

Если напор немного увеличится сверх того, который соответствует критическому градиенту, материал потечет, будет иметь место явление суффозии.

Возможность появления серьезных суффозионных явлений может быть предупреждена созданием достаточно длинных путей фильтрации для уменьшения гидравлического градиента. Для земляных плотин минимальное отношение длины пути фильтрации к напору должно быть не менее 5, что дает шестикратный коэффициент устойчивости при удельном весе грунта 2,65 и 50% пустот.

Для сильно проницаемого основания при отсутствии дренажа минимальное отношение пути фильтрации к напору должно быть не меньше 8 или 10.

8. ЭЛЕМЕНТЫ ЗЕМЛЯНЫХ ПЛОТИН

1. Способы возведения. Возведение земляных плотин может быть осуществлено:

а) методом послойной укладки — материал плотины разрабатывается экскаваторами, скреперами, драглайнами, доставляется на плотину, отсыпается, разравнивается, смачивается и укатывается;

б) методом намыва — материал разрабатывается любыми методами, но доставляется и укладывается с помощью воды;

в) полунамывным способом — материал укладывается с верховой и низовой граней плотины в виде дамб, пространство между которыми запол-

няется водой, а материал, укладываемый на валы, смывается к центру плотины.

■После расчистки местности под плотину наиболее ответственной задачей является подготовка основания. Оно должно быть подготовлено так, чтобы не было раздельной поверхности между материалом основания и материалом плотины. Естественная поверхность вспахивается и боронуется перед. укладкой на нее материалов плотины. Если грунты в плотину укладываются сухим способом, поверхность основания смачивается до укладки первого слоя, с тем чтобы каток вдавливал первый слой нового материала в старый.

При насыпном способе укладки плотины материал распределяется тонкими слоями и укатывается. Отмечены случаи, когда материал сбрасывался с эстакад. Такой метод не должен применяться, так как он дает пористое и неустойчивое тело плотины, склонное к оползанию. Слои после укатки не должны быть толще 30 *см;* обычно желательно делать их тоньше. По-видимому, наилучшим способом укладки проницаемых материалов является создание слоев толщиной 20—25 *см,* а для сжимаемых связных грунтов толщина слоя не должна превышать 10—15 *см.* }

Требуемая плотность тела плотины определяется на основании полевых опытов и достигается подбором толщины слоев, интенсивностью укатки, весом катков. Типичная плотина, выполненная таким способом, показана на рис. 35.

Водонепроницаемые связные материалы должны обладать перед укаткой оптимальной влажностью. Излишняя подвижность материалов под действием движущихся катков и машин указывает на избыточную влажность. Если влажность велика, то материалу необходимо дать некоторое время полежать, пока избыточная вода испарится. Для уменьшения влажности грунта можно рекомендовать устройство дренажей непосредственно в карьерах.

Нижние слои высоких земляных плотин должны иметь влажность, немного меньшую оптимальной, чтобы исключить избыточное поровое давление. Вообще говоря, в большинстве случаев целесообразно брать величину влажности материалов несколько ниже оптимума. Если опыты показывают, что желательно дополнительное увлажнение, целесообразно добавлять воду разбрызгиванием по укатанному слою перед укладкой нового слоя, поскольку в этом случае давление катка вызовет более или менее равномерное увлажнение слоя. Добавка воды производится к новому слою непосредственно перед укаткой. Для получения хороших результатов укатки необходимо практически насыщать нижележащий слой прямо перед катком.

Наилучшим типом катка является кулачковый, хотя могут быть с успехом применены и гладкие катки. Толщина слоев после укатки устанавливается обычно 10—15 *см* для непроницаемых материалов и 20 *см* и более— для проницаемых. Удельное давление катка на грунт достигается подбором.

Объемный вес материала плотины в плотном теле заранее известен, что и определяет требуемую технологию укатки: тип катка, вес его, число проходов. Обычно желательно, чтобы объемный вес укатанного материала несколько превышал объемный вес грунта в естественном залегании.

Требования к плотинам, возводимым намывным и полунамывным способами, аналогичны предыдущим. ■Полунамывной способ является в не-

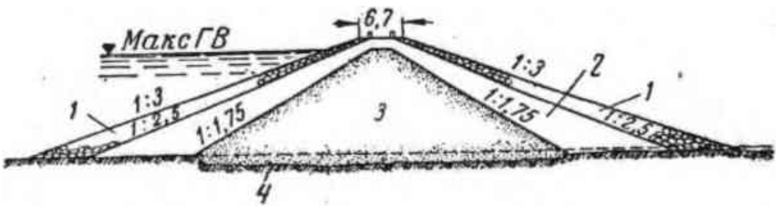


Рис. 35. Плотина Кончас. Нью-Мексико.

/—наброска; 2 — проницаемый укатанный грунт; *3* — непроницаемый укатанный грунт; *4* — линия скалы.

которых случаях более дешевым и удобным. В то же время плотины, выполненные намывным способом, обладают достаточной устойчивостью, а на полунамывных наблюдались случаи обрушения.

При намывном методе материал, поступающий из лотков или труб, откладывается по откосам плотины; более крупные частицы остаются на откосах, а мелкие частицы продвигаются к центру, причем мельчайшие переходят в центральный прудок и откладываются там. При этом подошва и откосы плотины являются более проницаемыми, что обеспечивает отвод воды от центральной части плотины. Даже в том случае, если дренаж ядра осуществляется по. вертикали, это явление имеет место не только в ядре, но и в зонах тела плотины, примыкающих к ядру.

В плотинах, выполняемых полунамывным способом, материал на откосы плотины укладывается из самосвалов и затем смывается струей воды гидромонитора, более мелкий материал проходит в центральный прудок и откладывается, образуя ядро, а более крупные частицы остаются у места сброса. В результате этого зоны плотины, по которым происходит движение самосвалов, нередко получались более плотными и менее водопроницаемыми, чем центральная часть. В некоторых случаях было отмечено, что материал, поступивший из самосвалов в валы, более плотен и непроницаем, чем отложившийся после размыва. Остающаяся в прудке вода медленно проходит через тело плотины, в результате чего со стороны центральной части плотины возникает гидростатическое давление на боковые ее грани. Вследствие наличия в теле плотины линз из сильно увлажненного мелкого материала устойчивость таких плотин значительно ниже. Этот метод мало применяется.

Наибольшее распространение получил метод намыва, при котором вода (в виде струи) под большим давлением подается из гидромонитора и направляется в выемку, подлежащую разработке. Скорость струи, выходящей из гидромонитора, достигает 30—60 *м/сек.* Разрушенные материалы уносятся по лоткам или трубам, по которым они поступают в тело плотины. Минимальный уклон подающих лотков и труб составляет 3—6% в/зависимости от материала. Грунт в карьерах разрабатывается различными способами в зависимости от его плотности, гранулометрического состава и дальности перевозки.

2. Материал для намывных плотин. Не„ все материалы годятся для устройства намывной плотины. Так, например, нежелательно использовать очень мелкий однородный материал, поскольку в теле плотины он будет уложен с плотностью, меньше критической. Также нецелесообразно использовать грунты из очень мелких частиц, таких, как глины и илы, поскольку эти частицы с трудом оседают и создают большие неплотности в укладке. Поэтому желательно, чтобы укладываемый материал был неоднородным по фракциям. Наилучший материал для намывных плотин дают ледниковые отложения, которые содержат все фракции, от глины до крупной гальки, и очень удобны для транспортировки.

Оптимальный материал для плотины, доставляемый из карьера, должен содержать 15—30% мелкого материала (супесь и мелкий песок крупностью от 0,005 до 0,15 *мм),* большая часть которого должна идти в ядро, а остальная часть мелкого песка (от 0,15 *мм* до гальки диаметром 15 *см* и больше) должна идти в тело плотины. Между этими крайними пределами крупности имеется большое количество фракций, которые могут быть использованы для устройства плотин.

Следует избегать коллоидальных материалов для устройства ядра, даже если этот материал присутствует в карьере. Грубые глины и илы являются наиболее удовлетворительным материалом для ядра. Ален Хазен и другие исследователи нашли, что эффективный диаметр материала ядрд должен быть не менее 0,01 *мм.* При этом диаметре фракций ядро уплотняется вполне удовлетворительно, при высоком же проценте более. мелких

фракций уплотнение ядра идет более медленно.

В прошлом были отмечены некоторые аварии с земляными плотинами, которые были связаны с недостаточной шириной ядра. Желательно иметь гидравлически намытое ядро с уклонами граней 3:1 или 4:1.

Материал наружных призм плотины должен обладать большей прочностью на сдвиг, чем материал ядра. Кроме того, очень важно, чтобы защитный слой ядра был значительно более непроницаемым, чем ядро. Так, <при разности водонепроницаемости в 100 раз обеспечивается устойчивость плотины. С этой точки зрения, если в реальных плотинах центральная часть шириной 3—5 *м* будет отвечать требованиям, которые предъявляются к ядру, то этого вполне достаточно для получения устойчивости и водонепроницаемости сооружения. Наименьшая ширина ядра должна быть порядка 6 ж, чтобы исключить неоднородность укладки. С этой целью необходимо, чтобы верхние слои плотины (7—9 *м)* или, по крайней мере, ее ядро выполнялись методом укатки.

Осадки земляных плотин зависят от материала плотины, основания и метода строительства. Принято возводить плотину несколько большей высоты и ширины, чем ее проектные размеры.

Для тела плотины, выполняемого слоями толщиной 15 *см* проницаемого или непроницаемого материала, нет необходимости предусматривать осадку, но нужно иметь в виду, что осадке может подвергнуться основание плотины. Для укатанной плотины допустимая величина осадки составляет 1%. Для намывной плотины осадки связаны с уплотнением ядра и зависят от гранулометрического состава намываемого материала. Допустимая величина осадки не превышает 4%. Осадка основания колеблется в больших пределах — от 0 до 8% высоты плотины, причем наибольшая осадка имеет место в период строительства. Предельные значения осадки после окончания строительства плотины должны быть не более 6%.

3. Крепление верхового откоса. Верховой огкос плотины укрепляется каменным покрытием или плитами. Покрытие должно быть уложено на хорошо подобранный фильтр и может быть трех типов: в виде каменной наброски, сухой каменной кладки и кладки на растворе.

Каменная наброска состоит из камней, сбрасываемых с самосвалов и вагонеток. Это наиболее желательный тип защиты откоса из-за его дешевизны и хорошего качества; он хорошо приноравливается к любым осадкам плотины. Никаких расчетов по этому типу покрытия обычно не производят, и размеры его определяются на основании опыта. Опыт эксплуатации показывает, что толщина покрытия не должна быть меньше 60% высоты волны. Обычно набросное крепление имеет толщину 0,5—1,0 *м.* Камень, употребляемый для набросного крепления, должен иметь размер не менее половины толщины слоя и наименьший размер 8—10 *см.* На рис. 36 показана типичная конструкция этого покрытия. Каменная наброска должна укладываться на хорошо приготовленный фильтр.

Сухая каменная кладка состоит из камней, тщательно вручную укладываемых по поверхности откоса с наименьшими пустотами между ними. В местностях, где камень дорог, а рабочая сила дешева, этот тип крепления может оказаться дешевле предыдущего.

Каменная кладка на растворе представляет собой мощение, в котором все швы между камнями залиты цементным раствором. Не все кам-

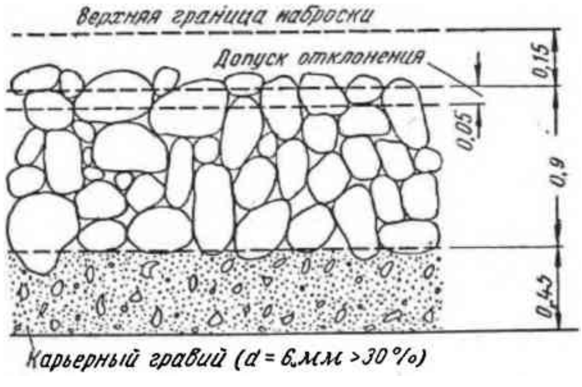


Рис. 36. Типичная конструкция ^крепления откоса каменной наброскси.

ни подходят для мощения. Они должны обладать определенной твердостью, прочностью и устойчивостью. Большинство вулканических пород дает очень хорошее покрытие.

Для крупных сооружений применяется бетонное покрытие верхового откоса. Первым типом является монолитное покрытие, состоящее из не-т прерывных железобетонных плит, уложенных по всей поверхности откоса с армированием в каждом направлении до 1,5%. Толщина монолитного бетонного крепления достаточна 15—20 *см.* Другим типом бетонного покрытия являются отдельные плиты размером 2Х2 *м.* Такие квадратные панели не требуют армировки, толщина плит — порядка 15 *см;* плиты укладываются с раздельными швами, с тем чтобы иметь возможность приспособиться к деформациям откоса. Во всех случаях устройства бетонных покрытий в плитах должны быть сделаны разгрузочные дренажные отверстия. Площадь отверстий равна 15% площади основания. Дренаж препятствует выпору облицовки при опорожнении водохранилища.

На земляных плотинах высотой более 10 *м* на низовом откосе устраиваются бермы. При пропуске через земляную плотину труб или водоводов их целесообразно укладывать в специальной траншее на бетонных опорах.

9. НАБРОСНЫЕ ПЛОТИНЫ

Каменнонабросные плотины получили распространение при строительстве в отдаленных местностях, куда доставка цемента для бетонной плотины обходится очень дорого. Ряд таких плотин имеет значительную высоту. Так, например, плотина Солтс - прингс, показанная на рис. 37, имеет высоту 98 *м;* проектируются еще более высокие плотины. Каменнонабросные плотины должны включать водонепроницаемый элемент или в виде ядра, как на рис. 38, или в виде экрана с напорной стороны, как показано на рис. 37. Обычно каменнобросцые плотины проектируются по эмпирическим данным, но имеются некоторые правила проектирования,

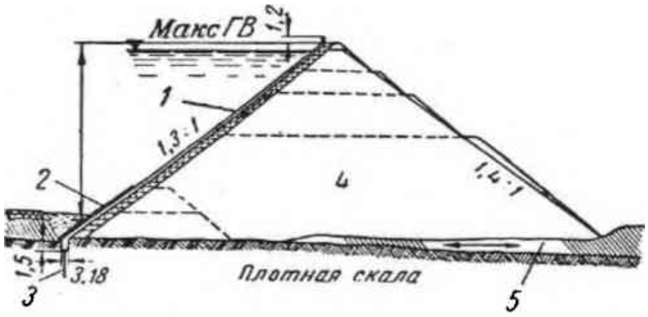


Рис. 37. Поперечное сечение плотины Солтспрингс.

1— железобетонные плиты толщиной от 0,09 до 0,3 jk ; 2 — деревянное крепление; *3* — цементационные скважины; *4* — свободная наброска; *5* — плотная укладка камня.

которые должны всегда учитываться. Методы расчета устойчивости каменнонабросных плотин аналогичны земляным.

При подготовке основания под плотину необходимо самым тщательным образом очистить поверхность, с тем чтобы наброска укладывалась непосредственно на основание, а не на какой-либо промежуточный слой. Важнейшее требование к основанию набросной плотины заключается в том, чтобы его материал не подвергался осадке или размыву при фильтрации через него воды. Для предупреждения такой фильтрации устраивается зуб до непроницаемого основания. Зуб должен захватывать русло и склоны ущелья, причем особая трудность заключается в устройстве гибкого сопряжения между экраном и зубом плотины.

Современные набросные плотины выполнены при отношении высоты к ширине основания, равном 2,5—3,0. Низовой откос делается с уклоном, равным углу естественного откоса набрасываемого материала, т. е. примерно 1 : 1,3—1 : 1,4. Если откос более крутой, то требуется дополнительная его обработка. Верховой откос выполнялся обычно с уклоном 1: [3]Д. По последним данным считается более желательным придавать верховому откосу также уклон порядка 1 :1,3, как на рис. 37.

Напорная грань плотины делается обычно слегка вогнутой от линии откоса, с тем чтобы не произошло выпучивания экрана при осадке плотины. Плотина высотой свыше 30 *м* должна

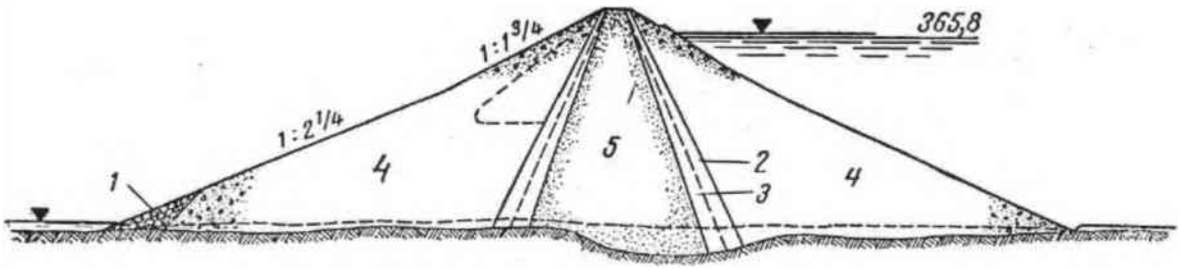


Рис. 38. Поперечное сечение плотины Стивенс.

1— крупная наброска; *2* — крупный материал; *3* — мелкий материал; *4* — каменная наброска со смачиванием (1,5 $л^3$ воды на I $л^3$ кладки); 5 — укатанное непроницаемое ядро (песчано-гравийная смесь).

иметь ширину гребня не менее 4,5 nt, и даже более низкие плотины должны снабжаться гребнем шириной не менее 3 *я.*

Практическая устойчивость набросных плотин очень велика, причем коэффициент запаса доходит до 5 или 6. Тем не менее при проектировании плотины должно быть обращено внимание на качество основания с точки сбрасывания или подъема камня. На плотине Солтспрингс .при укладке гранита максимальная высота сброса была 50 *я.* Практическая высота сбрасывания устанавливается опытным путем на месте работ.

Размеры камней или глыб, сбрасываемых в тело плотины, различны. При обычных самосвалах максимальный вес глыб не должен превышать

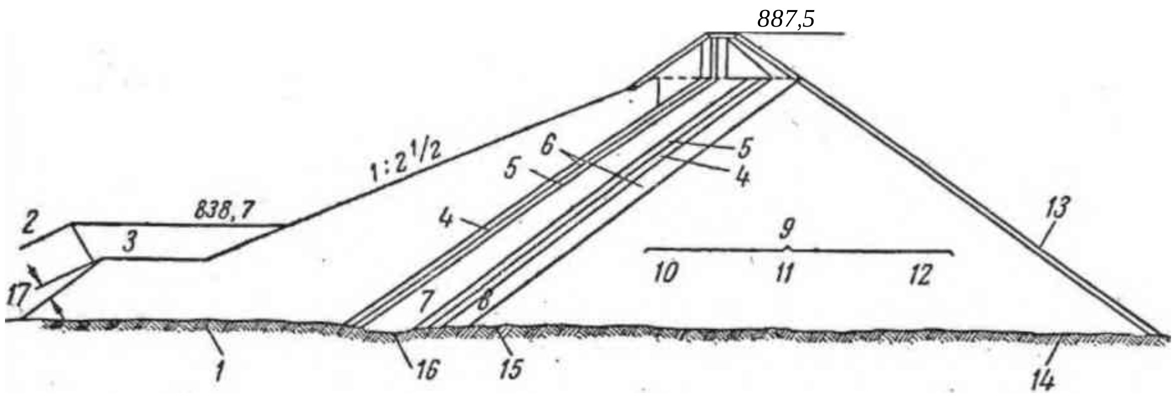


Рис. 39. Плотина Нантагала.

/ — наброска на очищенную поверхность; *2* — переменный уклон; *3* — отходы карьера; *4* — щебень от 12 до 75 *мм; 5* — песок; *6* — фильтр; *7* — непроницаемый слой с укаткой; *8* — фильтрационная засыпка; *9* — материал из ^карьера; *10* — мелкая фракция; // — средняя; /2 — крупная; *13* — крупный камень; *14* — подготовленная поверхность, очищенная до скалы; /5—выемка до плотной скалы; *16* — выемка под основание экрана.

зрения опасности соскальзывания плотины по нему.

Основная часть плотины должна быть выполнена из прочной скалы, которая не сможет скоро разрушиться и растрескаться. Совершенно непригодны сланцевые породы, а также те скальные породы, которые растрескиваются при взрывах. Метод укладки наброски меняется в зависимости от высоты ущелья и расположения карьера. Способы доставки камня из карьера и выгрузки его на плотину весьма разнообразны. Имеются различные точки зрения на высоту 3 т; при сбросе с железнодорожной платформы и крупных самосвалов вес отдельных глыб может доходить в среднем до 10 *т.*

В качестве противофильтрационного мероприятия устраивается водонепроницаемый экран. Защитный ©кран может быть сделан деревянным, стальным или бетонным. В некоторых случаях его можно выполнить из асфальтобетона. Деревянные экраны можно встретить лишь на старых плотинах, и потому практического значения Ьни не имеют.

Наиболее распространены сталь-

ные экраны. Они выполнены на плотине Пэнроз, Скагвей и др. Температурные швы обычно выполняются У-образными; соединения могут быть заклепочными или сварными; защита экрана от воздействия воды и воздуха осуществляется специальной окраской. Металлический экран на плотине Скагвей при тщательной окраске через 40 лет эксплуатации находится в хорошем состоянии.

На некоторых плотинах применен железобетонный экран; минимальная толщина экрана 30 *см.* Бетонные плиты размерами до 9Х18 *м* укладываются со швами расширения.

Для высоких плотин в узких ущельях должно быть предусмотрено устройство горизонтальных швов, обеспечивающих беспрепятственную осадку плотины. Полная вертикальная осадка на ряде плотин превысила 5% высоты; горизонтальное смещение может быть таким же. Если укладка тела плотины выполняется достаточно тщательно с использованием гидромониторов для заполнения пустот мелким материалом, то первоначальная осадка может быть достаточно велика, но в последующем осадка не должна превышать 2% высоты. Так, например, на плотине Солтспрингс высотой около 100 *м* проектируемая осадка была 4,8 *м* при горизонтальном смещении 1,3 *м.* Фактическая вертикальная осадка на гребне составила всего лишь 0,6 *м.* Осадка неоднородна и невертикальна. Наблюдается тенденция к сдвигу в направлении, перпендикулярном напорной грани. Большое влияние на осадку имеет форма ущелья. На плотине Солтспрингс максимальное смещение имело место примерно на расстоянии 40% по высоте от основания плотины.

Мелкие обломки скалы и пыль, проникая в промежутки между камнями под действием дождя, могут привести к смещению камней наброски. Поэтому целесообразно заблаговременно искусственно замывать поры в теле плотины мелким материалом с помощью гидромониторов.

Объем воды для замыва пор должен составлять примерно 2—4 $м^3$ на 1 $м^3$ кладки. Постоянный промыв, в процессе строительства обеспечивает предварительную осадку плотины и тем самым повышает ее устойчивость. Кроме того, постоянный приток воды вымывает небольшие линзы мелкого^ материала, исключая местные осадки камней. Характерно, что на плотине Сан Габриэль № 2 промыв был проведен в очень ограниченном объеме, в результате чего при первом же сильном дожде произошла осадка на 3,5 *м,* которая вызвала разрушение железобетонного экрана.

Очень важно с точки зрения уменьшения осадки плотины подбирать округлые камни без острых и тонких граней, которые ломаются при повышении напора.

На набросных плотинах, не допускающих перелива через их гребень, должны быть предусмотрены специальные водосбросы.

Интересным мероприятием по обеспечению водонепроницаемости тела плотины является устройство плотного ядра из глины или суглинка по типу намывных плотин; некоторые схемы этого устройства показаны на рис. 38 и 39. Необходимая толщина ядра зависит от водонепроницаемости материала. Во всяком случае можно отметить, что ядро не должно быть слишком тонким.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ПОДГОТОВКА И ЗАЩИТА ОСНОВАНИЙ ПЛОТИН[1]

Под термином «основание» понимается вся та часть площади под плотиной и в непосредственной близости от нее, которая в той или иной степени будет подвергаться воздействию нагрузки, размыву или фильтрации. "Хорошее основание должно обладать достаточной прочностью, для того чтобы выдержать вес сооружения и предупредить его скольжение. Оно также должно быть достаточно плотным во избежание чрезмерных утечек воды. Противодавление должно быть сведено к минимуму, а расходы воды, сбрасываемые через водослив или водосбросы, не должны нарушать основания. Для получения качественного основания необходимы значительные подготовительные работы. Нужно подчеркнуть, что более чем в 90% случаев разрушение плотин явилось следствием некачественного основания.

Обычно производится расчистка неплотного грунта до скалы, однако когда глубина залегания коренных пород значительна, плотину приходится строить на слабом основании. Решающим в этом вопросе является экономика.

10. ПОДГОТОВКА СКАЛЬНОГО ОСНОВАНИЯ

Поверхность скалы бывает обычно непрочной и непригодной для основания. В некоторых случаях необходима расчистка скалы на довольно., значи тельную глубину. Объем этой разработки определяется путем геологических исследований. При подготовке основания должно быть обеспечено сопротивление сооружения сдвигу как по поверхности, так и в толще грунта.

Для контрфорсных плотин на несцементированных сланцах со слабо наклонными пластами или других слабых основаниях необходимо устройство глубокой выемки под верховой зуб, которая заполняется железобетоном, прочно связанным с плотиной. Для того чтобы тело плотины имело наибольшую связь с основанием, необходимо проведение тща тельной подготовки поверхности основания. Тончайший слой грязи любого вида на поверхности скалы может нарушить связь между бетоном и основанием и обесценить всю работу по подготовке основания.

При подготовке скального основания не следует допускать нависающих плоскостей и следует избегать вертикальных плоскостей, за исключением тех случаев, где они сопрягаются с вертикальными строительными швами.

В тех случаях, когда скала, например сланцы, имеет тенденцию к разрушению при соприкосновении с воздухом, окончательная очистка основания должна проводиться непосредственно перед укладкой бетона, в противном случае скала может высохнуть и, напитавшись водой от бетона, образовать слой грязи между основанием и плотиной и тем самым исключить между ними всякую связь.

В исключительных случаях, когда скала распадается очень быстро, подошва котлована должна вскрываться сразу и немедленно обрабатываться битуминозными или асфальтовыми водонепроницаемыми ■ материалами.

В любых скальных основаниях можно ожидать небольшой фильтрации или просачивания, поскольку скала любой прочности всегда имеет некоторые трещины. Основным недостатком фильтрации являются созда ние ею противодавления, а также возможность вымывания тонких слоев глины или песка и, наконец, некоторая потеря воды.

Для того чтобы уменьшить филь-

[1] Основное внимание в гл. 5 обращено **на** производственные и конструктивные реко мендации, основанные на опыте строительства Исключены общеизвестные расчеты ф трации по Лену. Сокращенно изложены вопросы сопряжения бьефов, по которым на русском языке имеется достаточно литерату ры.

трацию в слабых основаниях до необходимой величины, требуется устройство выемки или искусственной непроницаемой завесы под зубом плотины. Для скальных оснований выработаны два типа зуба: траншея, заполненная бетоном, и цементационная завеса. Первый тип предпочтителен вследствие его небольшой стоимости. До устройства цементационных завес в отдельных исключительных случаях бетонные зубья устраивались на глубину до 15 *м* и больше. В последнее время установлено, что цементационная завеса весьма эффективна и недорога. Большинство высоких бетонных плотин снабжено цементационной завесой с верховой стороны основания для предупреждения фильтрации, что вместе с дренажными отверстиями в низовой части, за завесой, практически снимает ее противодавление. Для невысоких плотин на хороших скальных основаниях устройство завес и дренажа не является необходимым.

Цементация скальных оснований служит для уплотнения основания с целью уменьшения фильтрации и противодавления, а также для укрепления слабых и разрушенных пород. Вследствие этого принято начинать цементацию слабым раствором цемента 1 : 5 или 1 :6, постепенно увеличивая концентрацию раствора по мере укрепления основания. При этом методе раствор не только достигает наиболее отдаленных трещин, но и вызывает наименьшие нарушения естественных отложений. Для окончательной цементации часто применяется раствор из 1 части цемента и 2 частей воды; для очень слабой, разрушенной скалы в отдельных случаях применялся раствор: 1 часть цемента на 0,6 части воды. В некоторых случаях при наличии текущей воды в трещинах скалы применяется уплотнение основания горячим асфальтом.

В зависимости от типа основания применяется несколько видов цементационных завес для предупреждения фильтрации. Каждый вид состоит из одной или нескольких линий скважин. Одна линия скважин необходима при малых давлениях; при больших давлениях необходимо устройство нескольких параллельных линий скважин, закладываемых на небольшую глубину, но на большой площади.

Отложения глины, песка и ила в тонких трещинах не имеет существенного значения для условий фильтрации, но крупные трещины и каверны, заполненные грязью, могут оказаться очень опасными после наполнения водохранилища, поэтому целесообразны очистка этих полостей и каверн и заполнение их бетоном с последующей цементацией.

Верхняя часть цементационных скважин должна быть оформлена в виде трубы с. нарезкой, которая присоединяется к растворонасосам, трубы должны быть заанкерены или снабжены противовесами для предупреждения вырывания их давлением в трубах.

Величина давления при цементации выбирается очень тщательно, исходя из того, что нагнетаемый под давлением раствор не должен производить перемещения породы. В то же время давление должно быть достаточным, чтобы обеспечить быстрое ведение работ и достаточную глубину проникновения цементного раствора. Если есть опасение, что при цементации поверхностные слои могут быть разрушены, цементация ведется из потерны плотины при неполном ее окончании. Специальные буровые станки обеспечивают бурение из потерны.

При образовании цементационной завесы наибольшая глубина скважин в значительной мере зависит от характера скалы; имеется эмпирическое правило, не отличающееся особой строгостью, которое состоит в том, что наибольшая глубина цементации под поверхностью скалы должна быть равна одной четверти гидростатического напора над поверхностью скалы. Единственным точным приемом определения требуемой глубины цементации и давления является опытное нагнетание. Последнее заключается в подаче чистой воды в скважину с измерением расхода на заданном давлении.

Как указывалось ранее, большая часть неразрушенных цементированных скальных пород обладает достаточной прочностью для возведения на них плотин обычной высоты.

Однако при проектировании и изысканиях должно быть обращено внимание на трещины и пустоты в скале, на выветренные и разрушенные зоны, которые, разделяя основание на отдельные блоки, могут привести к неоднородным деформациям. Для такого типа оснований хорошие результаты получаются при цементации, причем предварительной операцией является промывка трещин. Узкие трещины могут быть легко промыты и зацементированы. Крупные каверны заполняются бетоном.

Для невысоких плотин можно допускать сохранение расчищенных небольших площадей слабой скалы в предположении, что площадь основания плотины их перекроет. В ряде случаев вертикальные глубокие трещины и каверны вычищались и заполнялись бетоном только на глубину, достаточную для образования пробки в трещине. Не представляется возможным указать какое-либо правило для определения необходимого объема или вероятной стоимости цементации. Данные должны быть получены из эксперимента в натуре.

Для уменьшения гидростатического давления и снижения, взвешивающих[1] усилий по основанию плотины в некоторых случаях целесообразно для высоких плотин пробурить линию скважин ниже по течению для предупреждения фильтрации. Дренажные скважины выводятся в дренажную галерею или какое-либо другое устройство, достаточное для отвода фильтрационной воды в нижний бьеф. Дренажные скважины не должны буриться до тех пор, пока не будут закончены все цементационные работы.

Для определения расположения и глубины дренажных отверстий нет определенных правил. Скважины диаметром 5—16 *см* располагаются на расстоянии 1,5—6 *м.* Глубина скважин зависит от характера скалы, но обычно ее назначают от одной четверти до половины ширины основания.

11. ПОДГОТОВКА ЗЕМЛЯНЫХ ОСНОВАНИЙ

Примеры сооружения бетонных плотин на слабых основаниях многочисленны. Но в США высота таких плотин не превышает 20 *м* для хороших оснований и 10 *м* для слабых. Это ограничение высоты связано с тем, что обработка слабого основания для защиты его от размыва и фильтрации значительно дороже, чем скальных оснований. Стоимость обработки слабого основания подчас является основной частью стоимости всего сооружения. Поэтому для высоких плотин целесообразно изменить конструкцию или переместить створ плотины. По конструктивным соображениям нет никаких оснований ограничивать плотины по высоте; вопрос должен решаться исключительно экономическим расчетом.

При подготовке слабого основания под плотину должно быть принято во внимание следующее:

а) основание должно обладать достаточной несущей способностью;

б) должна быть обеспечена устойчивость против скольжения;

в) фильтрация должна быть сведена к минимуму;

г) должны быть исключены суффозионные явления;

д) должна быть обеспечена защита против размыва нижнего бьефа.

Необходимо предупреждать чрезмерную, а также неравномерную осадку сооружения. Для полых плотин облегченного типа на слабых основаниях водобой и рисберма должны быть 'Тщательно укреплены. Должно быть обеспечено равномерное распределение нагрузки по основанию; так, например, вес полой плотины Матис Дайк был равномерно распределен с помощью подсыпки по всей площади основания. В некоторых случаях используются свайные ростверки. Для слабых оснований находят широкое применение различные типы свай — деревянные, стальные и бетонные. Материал свай зависит от их длины и характера основания. Однако некоторым дефектом свайных оснований является возможность вымывания грунта непосредственно под подошвой

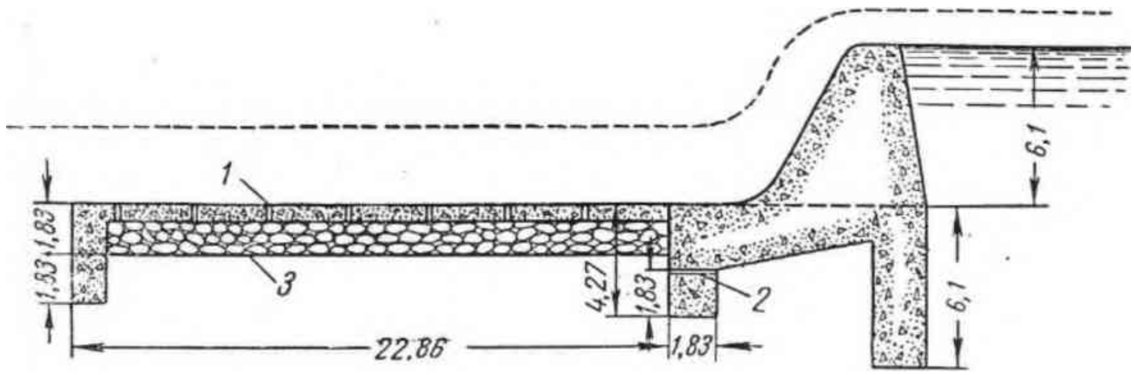


Рис. 40. Плотина Грэнит Риф.

/ — бетонные плиты 0,9Х0,9 *м* с открытыми швами; *2* — дренажные отверстия; *3* — мощение крупным камнем.

основания у оголовка свай. При широких фундаментах устройство свайных оснований нецелесообразно.

Плотина, расположенная на слабом основании, должна быть устойчива против скольжения. При малом коэффициенте трения по грунту могут быть использованы бетонные сваи для предупреждения сдвига. В некоторых случаях приходится ставить свайные кусты. Имеются примеры, когда сопротивление сдвигу плотины обеспечивалось тщательным заанкериванием плотины к глубокому зубу. Этот же метод применяется при расположении плотины на глинистом основании.

Фильтрационные расчеты ведутся графическими методами для проверки различных форм подземного контура. При любых условиях выходные скорости фильтрационного потока на низовом зубе должны быть меньше размывающих скоростей. Наикратчайший путь фильтрации, т. е. наименьшая длина подземного контура, определяется по Бляю или Лену. Чрезмерная фильтрация недопустима не столько из-за потери воды, сколько из-за возможности суффозионных явлений. Наилучшим образом борьба с фильтрацией осуществляется устройством верхового зуба, доведенного до непроницаемого основания.

В наносонесущих потоках отложения по дну водохранилища могут привести к резкому снижению потерь на фильтрацию. Так; например, плотина Грэнит Риф расположена на гравелистом основании; длина пути фильтрации не превышала трех напоров (рис. 40); значительная фильтрация, имевшая место при вводе в действие плотины, скоро прекратилась благодаря отложениям наносов.

Устройство зуба под плотиной, не доведенного до водонепроницаемого слоя, неэффективно. График на рис. 41 показывает, что для зуба, перерезающего 90% глубины проницаемого слоя, расход фильтрации будет составлять 35% от расхода при отсутствии зуба.

Если известна проницаемость основания, т. е. коэффициент фильтрации *k*, то фильтрационный расход по длине плотины легко .может быть определен по сетке двюкения. По формуле Казагранде [Л. 16] расход фильтрации определяется так:

$$Q = 0,00045W/s, \qquad (33)$$

где Q — расход, *м?)сек'*,

L — длина плотины,

k — коэффициент фильтрации, *м*1мия1м,²*

H—напор на плотине,

s — отношение числа квадратов между соседними эквипотенциальными линиями к числу квадратов между соседними линиями тока.

Суффозионные явления представляют собой вымывание материала основания фильтрующей водой. В этих случаях грунт становится перенасыщенным, подвижным и неспособным воспринимать нагрузку. Поэтому плотина должна рассчитываться на этот случай. Чем ближе друг к другу расположены эквипотенциальные линии, тем больше скорость фильтрации и тем больше потеря напора по длине. Резкое сближение линий имеет место

при обтекании фильтрационным потоком острого угла. На верховой грани сооружения и в любом другом месте под ним ©то повышение скорости фильтрации .не имеет существенного значения, поскольку материал основания лишен возможности перемещаться. Особенно существенно это увеличение скоростей в низовой части основания плотины. Эти условия .могут быть улучшены устройством низового зуба, с помощью которого высокие скорости фильтрации переводятся к низу зуба. Однако в этом случае увеличение противодавления на низовом зубе плотины влияет на общую устойчивость сооружения.

При оценке устойчивости сооружения должно учитываться противодавление. Величина противодавления

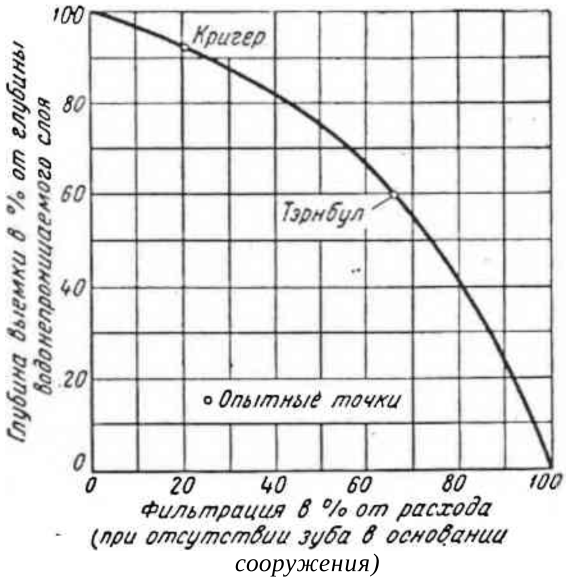


Рис. 41. Соотношение между фильтрацией и глубиной выемки.

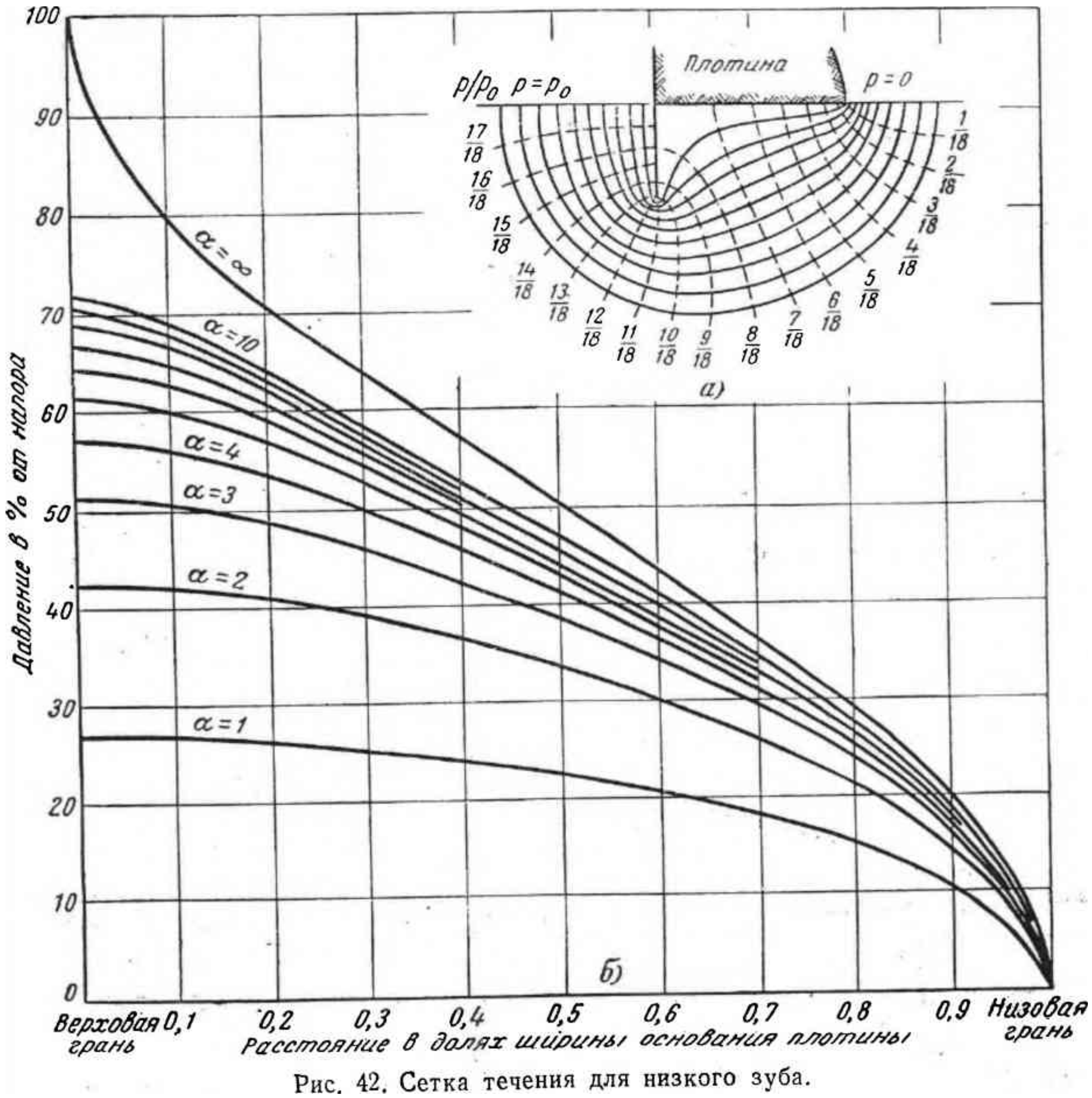


Рис. 42. Сетка течения для низкого зуба.

определяется по сетке движения. При наличии достаточных исследований геологического строения основания коэффициент запаса для плотины может быть принят несколько заниженным. Противодавление должно рассматриваться не только по контакту плотины и водобоя, но и для более глубоких точек. Так, например, для плотины или водобоя выше дренажа не будет иметь место противодавление, но в нескольких метрах от основания будет иметь место гидростатическое давление. В некоторых случаях гидростатическое давление может приподнять насыщенный грунт. Другими словами, все дренажи должны быть очень тщательно запроектированы. Величина противодавления на водобое должна быть уравновешена весом самого водобоя и слоем воды на дне. Следует иметь в виду, что при работе водослива глубина воды на водобое несколько снижается. Рисберма увеличивает путь фильтрации.

Противодавление можно уменьшить устройством верхового зуба или понура. На рис. 42 показан эффект влияния одиночного верхового шпунта на величину противодавления под плотиной, расположенной на проницаемом основании бесконечной глубины.

На графике а представляет собой отношение ширины плотины по основанию к глубине зуба. Линза из проницаемого материала, расположенная за низовым зубом, уменьшает противодавление. Расположение же линзы со стороны верхнего бьефа увеличивает давление. Толщина водобоя и рисбермы, на которые воздействует противодавление, может быть уменьшена путем анкеровки их с помощью свай к основанию.

12. РЕКОМЕНДУЕМЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОДЗЕМНОГО КОНТУРА

До настоящего времени не выбраны какие-либо четкие рекомендации по проектированию подземного контура плотин на слабых основаниях. Так, собранный Леном материал по 150 плотинам показывает исключительно разнообразное решение этого вопроса. Очень многое зависит от местных условий, поэтому никакие стандартные указания неприменимы. Общепринятой можно считать схему, при которой сооружение включает (рис. 43) понур, банкет с фильтром, верховой зуб, основной дренаж и водобой на обработанном фильтре и низовой шпунтовый ряд. Крепление водобоя предназначено для защиты плотины от подмыва, если рисберма, выполненная в виде наброски, будет размыта. В конце водобоя устроен шпунтовый ряд.

На плотине Империел было сделано несколько шпунтовых рядов. Однако установлено, что одного ряда шпунта, забитого в верховой части понура, вполне достаточно. Целесообразно устройство вспомогательного зуба в верхней части подошвы плотины, с тем чтобы уменьшить величину противодавления. Наилучшая схема может быть получена только путем анализа сетки течения или по аналогии с выстроенными сооружениями.

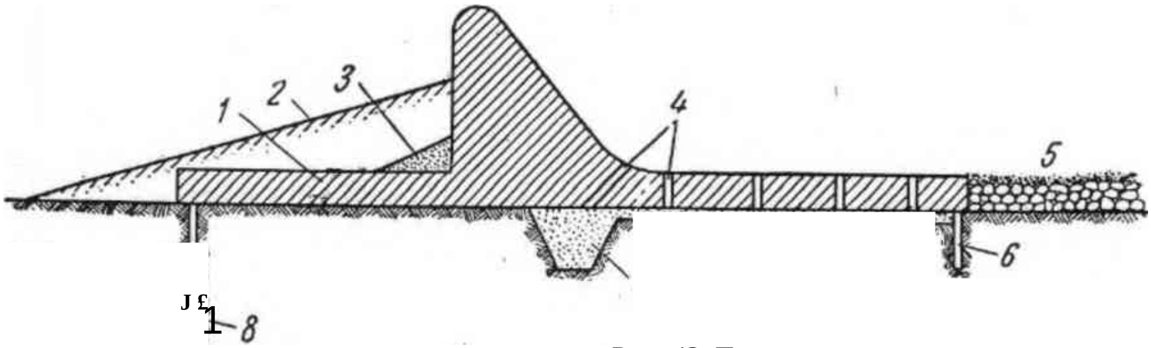


Рис. 43. Типовая схема.

/ — понур; *2*~ пригрузка; 3 — фильтр; 4 —дренажные отверстия; 5 —наброска; *6* — шпунтовый ряд рисбермы; 7 — основной дренаж; *8*~— шпунтовый ряд понура.

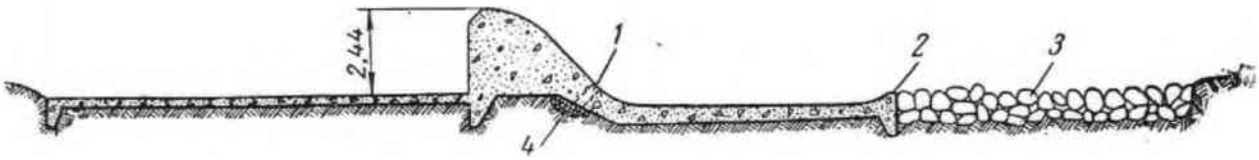


Рис 44. Поперечное сечение плотины Кочити.
1 - дренажные отверстия; *2* - порог-отклонитель; *3* - каменная наброска; *4* - гравийный фильтр.

На плотине Свирской ГЭС (СССР) зуб со шпунтовым рядом устроен в верхней части понура. Для глинистого основания это мероприятие обеспечило достаточную длину пути фильтрации. Удлинение дренажа под понур значительно уменьшило противодавление.

Плотина Кочити (штат Нью-Мехико) расположена на песке, гравии и валунах; она имеет коэффициент запаса на сдвиг, равный 5,5. Под плотиной (рис. 44) был устроен дренаж из тщательно подобранного гравия.

Применение понура, предназначенного для удлинения пути фильтрации, значительно лучше, чем усиление водобоя, поскольку в этом случае вес сооружения, необходимый для уравновешивания противодавления, может быть меньшим. Понур может быть выполнен из железобетона или любого водонепроницаемого грунта. Необходимо обращать особое внимание на возможность раскрытия шва между понуром и плотиной вследствие неравномерной осадки. При резком понижении уровня водохранилища может потребоваться специальное закрепление откоса отсыпки.

Как правило, верховой зуб следует доводить до водонепроницаемого основания. Зуб может состоять из бетонной диафрагмы, стальною и деревянного шпунтов. Применение бетонного зуба целесообразно в том случае, когда водонепроницаемые породы находятся в пределах досягаемости, а крупные валуны в русле препятствуют забивке шпунтовых рядов. При использовании шпунта для отрывки траншеи под зуб стенки последней нарушаются и может возникнуть фильтрация; это несколько снижает эффективность зуба, если он устраивается не в водонепроницаемом материале. Ширина бетонного зуба делается как можно меньшей, насколько позволяет выемка. Зуб не армируется, если только к нему не присоединяется плотина для предотвращения скольжения.

Для плотин на слабых основаниях широкое применение нашли шпунтовые ряды. При легком их погружении глубина шпунта невелика. В тех случаях, когда возможен выпор грунта, целесообразно применять шпунты усиленного профиля. На плотине Форт Пек шпунты этого типа весом 10 *кг!пог. м* опускались на глубину 45 *м* с помощью подмыва. Более легкие типы шпунтин использовались в аналогичных условиях и при такой же глубине на плотине Кингслей. Наличие валунов в грунтах основания препятствует забивке шпунта даже усиленного поперечного сечения.

Деревянный шпунт может быть использован опытным персоналом только для малых глубин при благоприятных геологических условиях.

Устройство дренажей предназначено для отвода фильтрационной воды из-под плотины. Слоистая скала, рваный камень и отверстия в водобое не являются эффективными, если они не защищены фильтром. Если основной дренаж, показанный на рис. 43, был бы сдвинут ниже по течению, то понур мог бы быть укорочен без изменения пути фильтрации, однако это мероприятие увеличило бы противодавление на подошву плотины и понур и потребовало бы большего объема бетона. Таким образом, расположение главного дренажа определяется экономическими факторами. На плотине Кросс Кат (рис. 45) водонасыщенный слой песка был встречен после слоя гравия на 3 *м* ниже плотины. Чтобы уменьшить противодавление, под водобоем был устроен дренаж, как показано на чертеже; было добавлено 12 колодцев. Под колодцами укладывались фильтры, со-

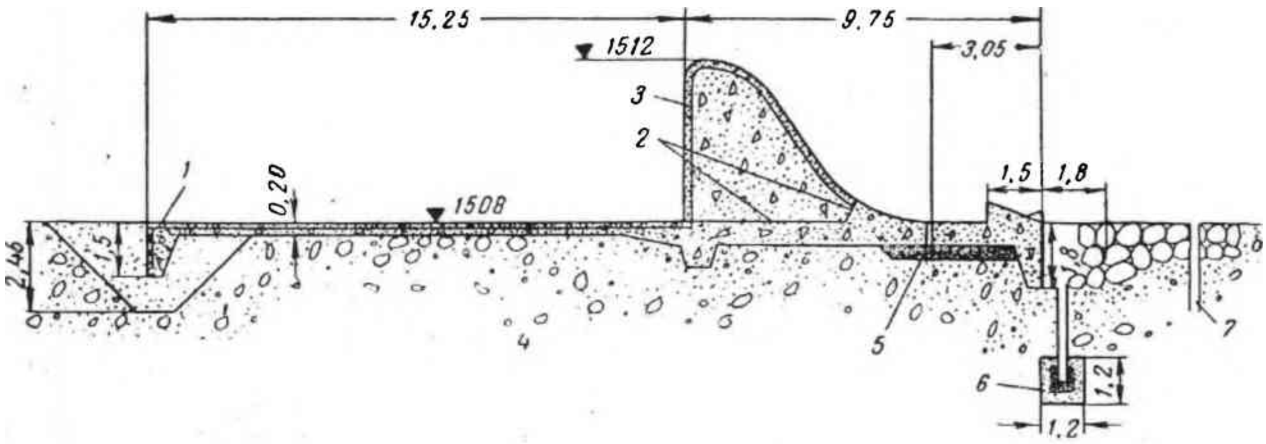


Рис. 45. Плотина Кросс Кат.

I— резиновая противофильтрационная прокладка; *2* — хорошо очищенная поверхность шва с насечкой;-.? резиновая прокладка; *4* — гравийное основание; *5* — гравийный фильтр; *6* — обратный фильтр.

стоящие из слоев материала, пористость которого уменьшается с глубиной. При достаточной эффективности основного дренажа фильтры под понуром не являются обязательными.

13. РАЗМЫВЫ ЗА ПЛОТИНАМИ

Размыв за водосливными плотинами возникает вследствие воздействия больших скоростей течения на недостаточно прочное основание. Скорости течения могут быть значительно выше бытовых; при больших скоростях вода проникает в трещины основания, вызывая дополнительное давление и разрушение. /

■ Эффективным методом гашения падающей воды является гидравлический прыжок. Однако при недостаточных глубинах нижнего бьефа прыжок может оказаться сдвинутым за плотину и вызвать размыв . основания (рис. 46,а—г). В этих случаях целесообразно устройство водобойного колодца для получения необходимой глубины в нижнем бьефе. В отдельных случаях гаситель может быть устроен в виде небольшой плотины-порога ниже по течению. При глубине воды в нижнем бьефе, превышающей глубину для затопления гидравлического прыжка, прыжок продвигается вверх по течению и на наклонной грани (рис. 46,д, *е)* полностью затапливается. Это условие часто достигается с помощью наклонного водобоя с уклоном, не превышающим 1 :4, который обеспечивает более равномерное распределение скоростей.

Если гаситель снабжен водобойными стенками и зубьями, как показано на рис. 47, может возникнуть видоизмененный гидравлический прыжок, который требует меньшей длины крепления нижнего бьефа.

Размеры водобойного колодца со вспомогательными устройствами могут быть определены по Блайсделу [Л. 17]: пусть $Л_{НБ}$—глубина нижнего бьефа при высоких горизонтах; *D'* — требуемая глубина нижнего бьефа для

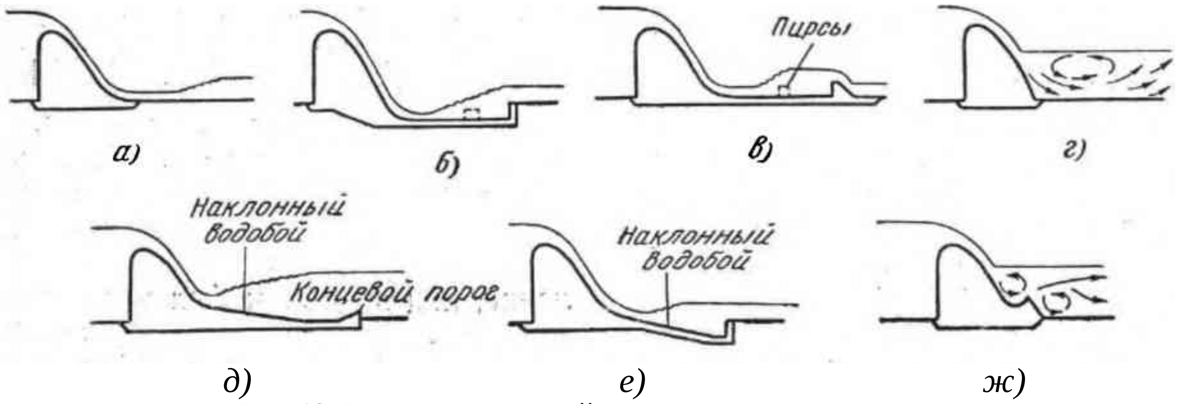


Рис. 46. Водосливы с устройствами против размыва.

затопленного прыжка; h_0 — глубина при низких горизонтах; v—скорость при низких горизонтах; L — длина колодца; g— ускорение силы тяжести; Fr — число Фруда. Тогда:

(34)

/jНВ=у('/8Fr + 1-1); (35)

для Fr = 3— 30

O' = (М0-^)Л$_{НБ}$; (36)

для Fr = 30—120

D' = 0,85ft$_{НВ}$; (37)

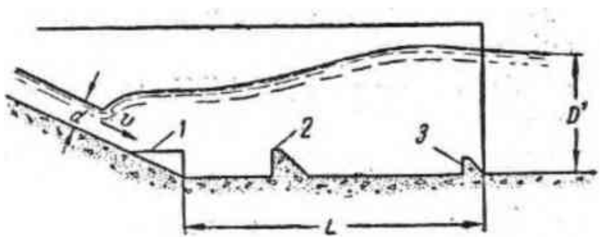
для Fr = 120 — 300

D'=(l,00-^)А$_{НВ>}$ (38)

для Fr — 3 — 300

. (39)

Эти зависимости основываются на 274 экспериментах на водосливах с уклонами, меняющимися от 1 до 2,6 и от 1 до 1,5 при скоростях 0,9—14 *м/сек.* Приведенные выше формулы пригодны для водосливов высотой до 25 *м.* При большей высоте должны быть проведены специальные опыты по определению условий кавитации.



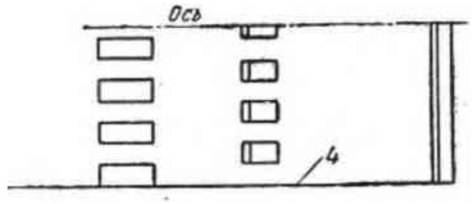


Рис. 47. Схема успокоительного бассейна.

1 — расщепители потока; *2* — донные пирсы; *3* концевой порог; *4*— стенка.

Как указывалось ранее, донный прыжок нежелателен вследствие возникновения больших скоростей на дне. Для предупреждения затопления целесообразно устройство длинных наклонных водобоев. Опыты показывают хорошую работу их при уклоне 1:4.

Для отброса струи за пределы сооружения используется носок в конце водослива; такая конструкция выполнена, например, на плотине Грэнд-Кули.

Для арочных плотин выполняются водосливы, которые имеют в качестве гасителя специальные бетонные подушки, а глубина в нижнем бьефе, необходимая для успокоения струи, достигается устройством небольшой водосливной плотины на некотором расстоянии от основной плотины.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ВОДОПРИЕМНЫЕ И ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

14. ВОДОПРИЕМНИКИ ГИДРО ЭЛ ЕiКТР ОСТ АН ЦИ И

Водоприемные устройства ГЭС служат для подачи воды в деривационные сооружения при заданном режиме работы ГЭС.. Водоприемник включает в себя решетки для* предотвращения поступления в водоводы сора и льдин размерами, достаточными для повреждения оборудования, и затворы, которые регулируют пропуск воды через водоприемник. Если деривация включает в себя лоток или канал^ возможно устройство двух или более водоприемников: одного, расположен^ного в головном узле, и друго-

го — в конце канала, в напорном бассейне.

Водоприемники ГЭС могут быть разделены на два больших класса: низконапорные и высоконапорные. Высоконапорные водоприемники применяются в тех случаях, когда имеет место глубокая сработка водохранилища. Низконапорные водоприемники применяются при малых сработках уровня воды, например при суточном или недельном регулировании. Четкое разделение между обоими классами провести трудно. На рис. 48 показана конструкция водоприемника установки Грэнд-Кули. Потери напора на этом водоприемнике не превосходят 15% скоростного напора.

1. Общие требования к водоприемникам. При проектировании водоприемников должны соблюдаться следующие условия:

а) Конструкция должна быть устойчивой в опорожненном состоянии. Низконапорные водоприемники обычно устраиваются в продолжении плотины или составляют часть ее, и потому в отношении их должны быть выполнены все требования, предъявляемые к плотинам. Высоконапорные водоприемники в виде открыто стоящей башни должны выдерживать давление льда и сейсмические усилия.

б) Скорости протекания воды через решетки, затворы и другие элементы водоприемника должны подбираться исходя из экономических и технических требований.

в) Очертания гидравлических контуров водоприемника должны быть такими, чтобы переход статического напора в скоростной был равномерным и сопровождался наименьшими потерями напора.

г) Водоприемник должен быть приспособлен для постоянной работы. Вся аппаратура и вспомогательные устройства должны быть взаимно связаны и оперативны в работе. Необходимость в ремонте трубопроводов турбин й входных затворов должна быть сведе**на** к минимуму.

Особое значение при проектирова**нии** водоприемника имеет характер течения потока в нем; контуры его должны быть выполнены предельно обтекаемыми для устранения излишних потерь напора. Изменение сечений должно выполняться плавно, без резких переходов. Затрата времени на детальное проектирование водоприемника будет полностью оправдана высоким качеством его работы. Наиболее желательной и экономичной кривизной для изменения сечений является такая, при которой скорость меняется по прямой. На водоприемнике Грэнд-Кули на р. Колумбии большое внимание было обращено на переходной участок между водоприемником и трубопроводом сейчас же после затворов. В этом водоприемнике от прямоугольного сечения высотой 9 *м* при ширине 4,6 *м* на расстоянии 9,5 *м* был осуществлен переход к диаметру трубопровода 5,5 *м.*

Конструкция входных устройств водоприемников должна обеспечивать прочность и устойчивость сооружений. В низконапорных водоприемниках при наличии возможности полной закупорки решеток льдом или сором все элементы сооружения должны быть рассчитаны на полное гидростатическое давление. Ввиду редкой повторяемости этого явления в расчетах прочности могут быть допущены повышенные напряжения. В низконапорных установках, расположенных в теплом климате и на реках, несущих небольшое количество сора, за максимальный расчетный перепад на решетках принимают 1,5—1,8 *м.* С увеличением заглубления решеток уменьшается опасность полной закупорки решеток. Бычки и раздельные стенки, на которые опираются решетки и затворы, должны быть рассчитаны на всевозможные случаи нагрузки. В частности, при раздельном входе к агрегатам, учитывая возможность заполнения одного из пролетов решетки сором, бычки должны быть рассчитаны на полное одностороннее боковое давление воды.

Конструктивные решения низконапорных водоприемников очень разнообразны и зависят от местных условий. По этому вопросу могут быть даны рекомендации общего характера.

Мостик для очистки решеток должен быть расположен как можно ниже над поверхностью воды, лишь

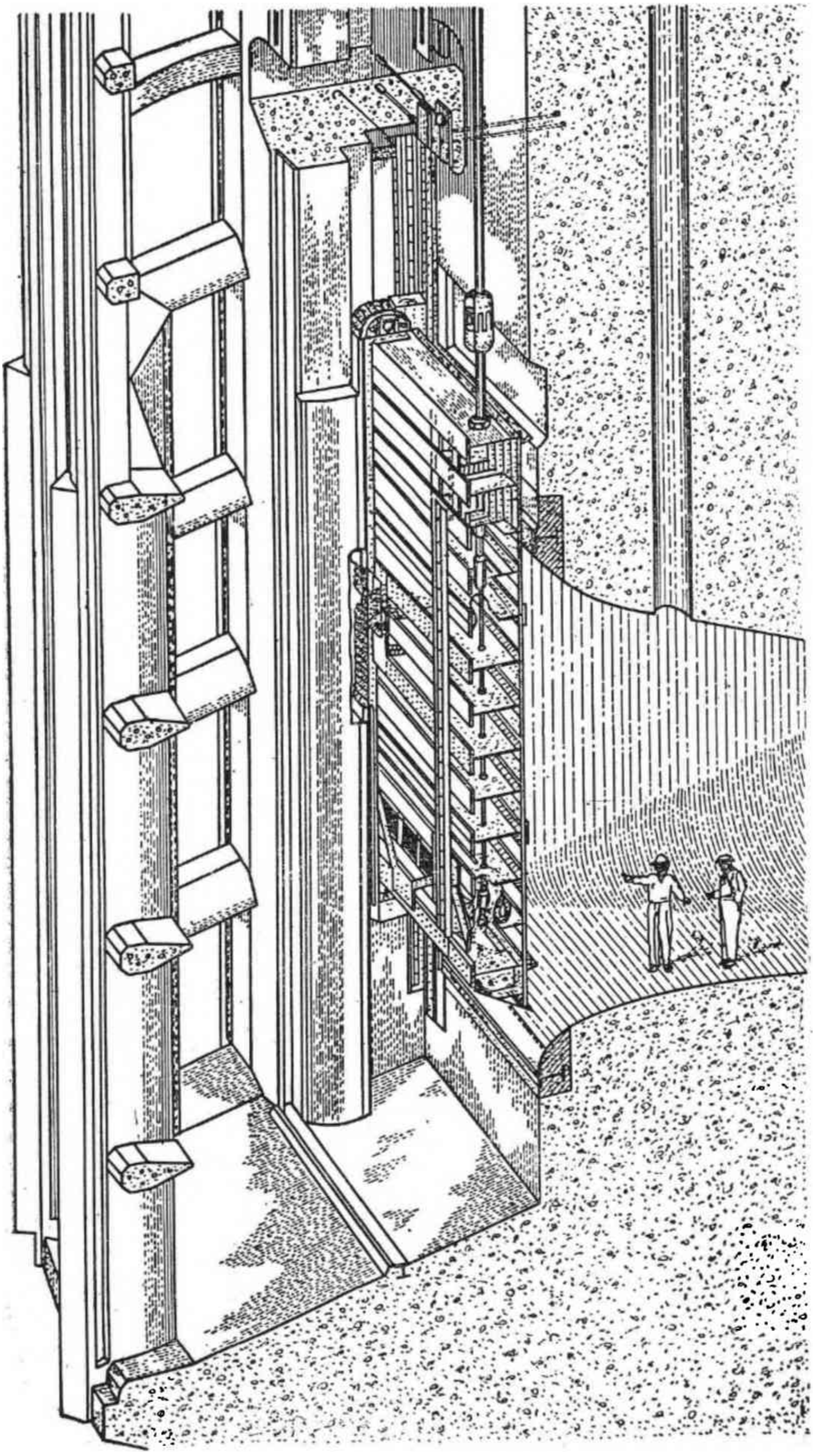


Рис. 48. Водоприемное устройство ГЭС Грэнд-Кули.

слегка выступая над максимальным уровнем. Низконапорные водоприемники очень часто выполняют функцию плотины и потому должны рассчитываться на устойчивость и противодавление. Необходимость ремонта решеток является весьма редкой, и поэтому лишь в отдельных специальных случаях перед решетками следует предусматривать ремонтное заграждение.

При устройстве порога под затвором нецелесообразно выполнять его в процессе строительства водоприемника, так как это приводит к затруднениям при монтаже затвора. Удачным приемом является опускание порога вместе со щитом в оставленную штрабу в бетонном массиве.

Во всех водоприемниках, в особенности тех, от которых отходит трубопровод, необходимо предусматривать аэрационные устройства или в виде бетонной шахты за затворами, или в виде трубы, специально защищенной от обмерзания.

Необходимость устройства закрытого помещения над водоприемными устройствами определяется обычно климатическими условиями.

Для маневрирования затворами и решетками предусматривается портальный или козловый кран, проходящий по всему водоприемному фронту. Для крупных ~~ГЭС целесообразно предусматривать индивидуальные подъемники на каждом водоприемнике.

Для сброса льдин и сора во многих случаях^ за решетками устраивается сбросной лоток, который обеспечивает удаление плавающих тел в нижний бьеф. Размеры сбросного лотка должны обеспечить удаление льдин значительных размеров.

2. Защита водоприемников от сора. Для отвода льда и сора к сбросному отверстию водосброса во многих случаях необходимо устраивать отклоняющие устройства в виде запани или буны, расположенных под углом 30 или 45° к направлению течения. В некоторых случаях устраиваются бетонные стенки, опирающиеся на отдельные опоры. Этот тип неэкономичен, поскольку защитная стенка должна выдерживать давление льда. Однако эти устройства вполне себя оправдывают в.суровом климате при небольшой глубине верхнего бьефа и малом погружении водоприемников, значительно уменьшая ледовые затруднения.

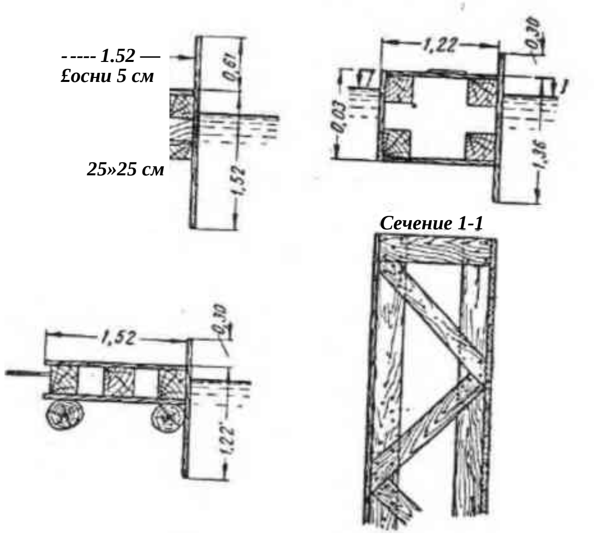


Рис. 49. Типы запаней.

Ьольшей частью защитные устройства оформляются в виде плавающей запани из бревен или брусьев (рис. 49) с защитным щитом, предотвращающим подныривание сора и льда под запань. Недостатком этого типа запани является ее быстрая изнашиваемость, которая может быть уменьшена окраской или пропитыванием специальными растворами.

На некоторых ГЭС защитные запани устраиваются из металлических труб или понтонов, , закрепленных отдельными секциями на стальном тросе заанкеренном по концам.

Растягивающие усилия в тросе удерживающем запань, зависят от глуины погружения, скорости течения и кривизны запани.

Для наивыгоднейших условий работы, на которые должно рассчитываться сооружение, необходимо учитывать давление ветра, а также накапливание перед запанью льда и сора. Длина секции не должна быть слишком большой, так как это приводит к увеличенным усилиям в тросе. Глубина погружения запани под воду выбирается *м.* Размеры водосбросного отверстия, расположенного в конце запани, должны быть достаточными для пропуска крупных льдин и сора Водосбросное отверстие должно быть оборудовано шандорными или клапан-

ними затворами для регулирования сброса льда.

Сороудерживающие решетки, служащие для защиты водоприемника от плавающих тел, обычно располагаются перед затворами. В прежних проектах почти во всех сучаях решетки располагались со слабым наклоном, что облегчало их очистку с помощью механизмов или вручную. С появлением усовершенствованных очистных механизмов решетки монтируются с вертикальным расположением стержней.

Расстояния между стержнями решеток берутся различными: для малых турбин обычно назначают просветы 60 70 *мм*, для крупных установок при больших расходах воды просвет между стержнями не превышает 120—150 *мм*, так как предметы большего размера, прошедшие через решетку, могут повредить затворы или рабочие колеса турбин. Опорные конструкции решеток должны рассчитываться на значительные усилия, возникающие при забивке решеток сором. Обычным критерием для средних условий является забивка решетки на 25% живого сечения, но решетка должна быть также устойчивой при предельном напряжении в металле и полной забивке ее.

Сороудерживающие решетки выполняются из прямоугольных стальных стержней, расположенных параллельно. Они обычно выполняются отдельными панелями шириной 1,2—1,5 *м* и длиной, обеспечивающей удобства маневрирования. Опорные 'конструкции выполняются из двутавровых балок. Толщина стержней обычно 10—12 *мм* при ширине 60—75 *мм*. *В* промежутке между опорными конструкциями (рис. 50) решетки соединяются болтами с насаженными на них между каждым стержнем отрезками труб. Болтовые отверстия располагаются ближе к низовой части стержня с тем, чтобы не препятствовать свободному продвижению зубьев очистительной

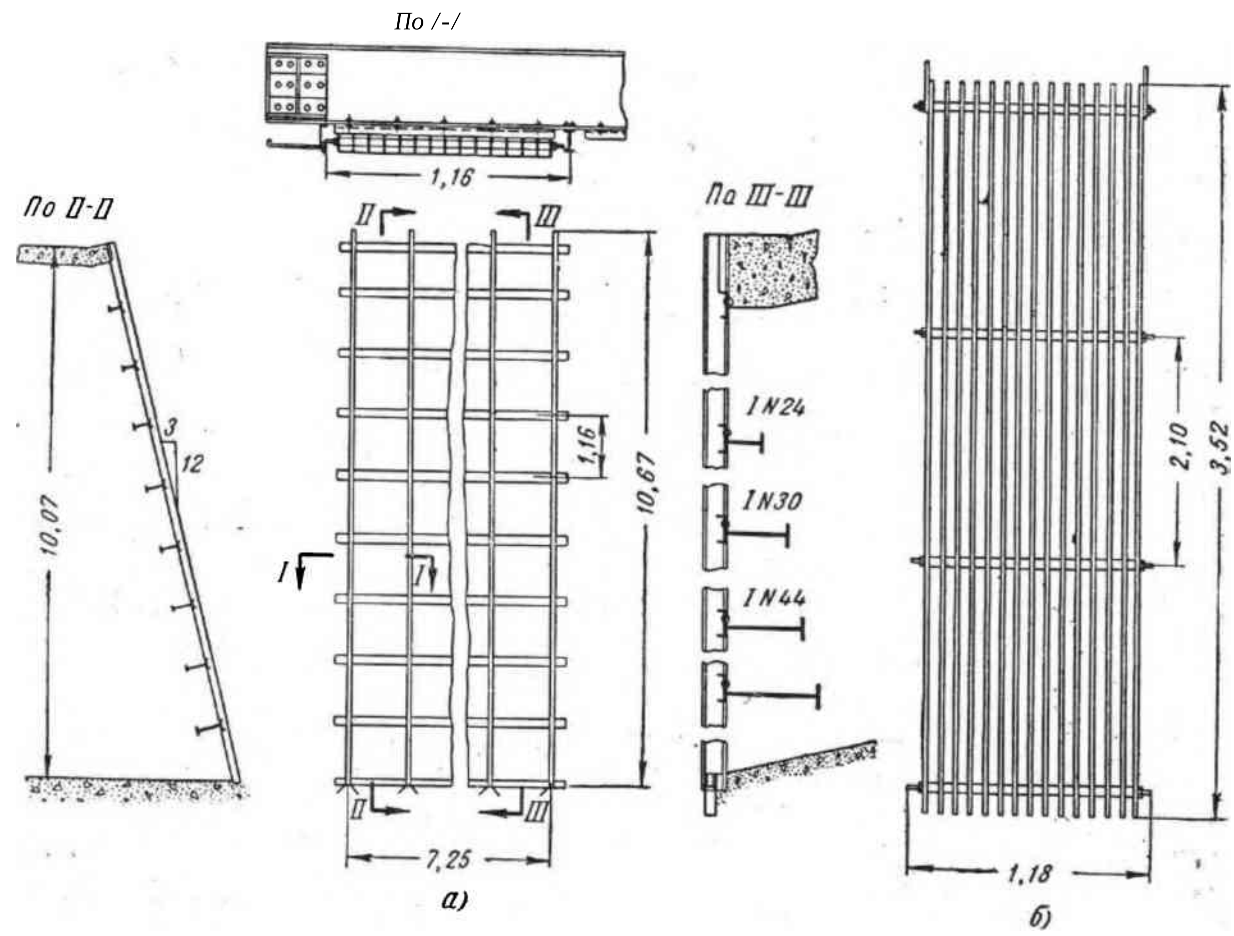


Рис. 50. Грубые решетки на ГЭС Софт Мепл.
а — опоры и направляющие; *б* - деталь секции.

машины. Эта схема неудачна вследствие больших потерь напора.

Для малых установок при отсутствии подъемного крана размеры решеток выполняются такими, чтобы можно было поднимать их вручную. При наличии крана решетки могут быть смонтированы из больших секций. Особое внимание должно быть обращено на устойчивость решетки при движении по ней очистительной машины. Очень важным условием является соблюдение ровной поверхности с напорной стороны, с тем чтобы ничто не мешало перемещению очистного механизма. При выполнении решеток секциями должно быть обеспечено тщательное стыкование каждого стержня смежных секций.

Очистка решеток на малых ГЭС осуществляется вручную с помощью вспомогательных приспособлений. На глубинных водоприемниках очистки решеток практически не требуется. Затраты труда на очистку решеток могут быть значительно уменьшены устройством воздушной системы, подающей пузырьки воздуха у низа решетки. Для крупных ГЭС повсеместно применяется механическая очистка с помощью специальных очистительных машин различных конструкций (рис. 51).

Для малых ГЭС с низконапорными водоприемниками при небольшом расстоянии между стержнями решеток скорости течения в решетке не должны превышать 0,75 *м!сек.* Для крупных низконапорных водоприемников при механической очистке решеток можно увеличить скорости до 1,5 *м!сек.* Так, например, на установке Уилер Дэм допущена скорость 1,5 *м!сек.* При этих условиях и расходе через решетку порядка 266 *мР/сек* потеря напора в решетке не превышала 3 *см.* Как правило, потеря в решетках составляет 3—15 *см.*

Для высоконапорных водоприемников скорости входа могут быть несколько увеличены, поскольку очистка решеток представляет собой довольно редкую операцию. Отмечена успешная работа ряда водоприемников при средней скорости течения через решетку 3—3,5 *м!сек.*

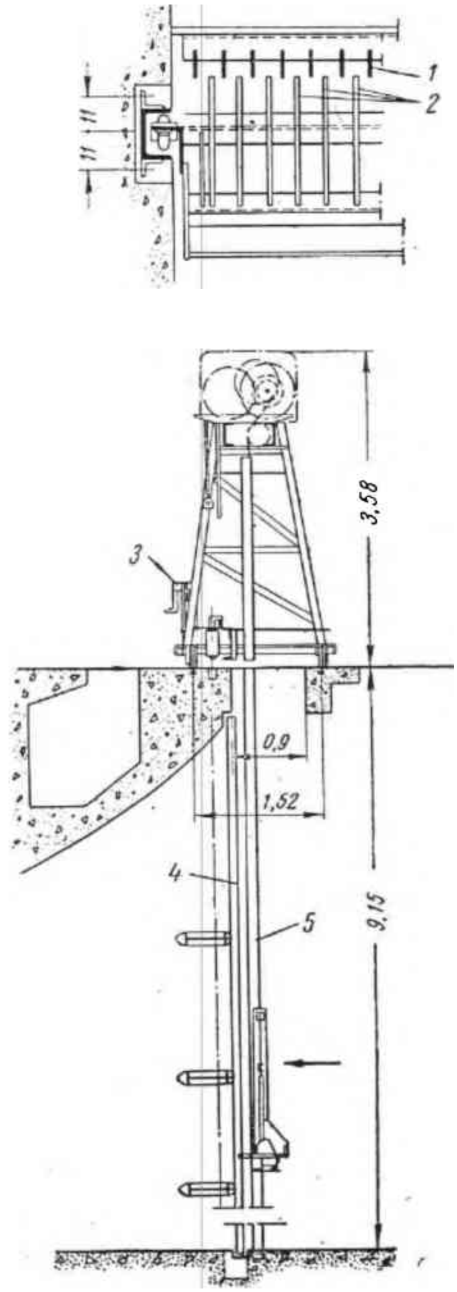


Рис. 51. Сороудерживающие решетки установки Вандфильд.

1 — стержни решеток; 2 — зубья очистительной машины; *3* — механизм перемещения очистительной машины; *4* — решетка; *5* — направляющие.

Местные потери в водоприемниках измеряются в долях скоростного напора и определяются по формуле

= Ч = (40)

где h_v — скоростной напор;

— потери напора;

v — средняя скорость протекания воды в решетке, *м^ек.*

Потери во входных решетках обычно малы вследствие незначительных скоростей течения в них, принимае-

мых для облегчения очистки решеток. Для чистых решеток достоверным значением для формулы (40) может служить величина, определяемая уравнением

$$k = 1{,}45 — 0{,}457? — /?^2, \qquad (41)$$

где (7? — коэффициент заполнения плотцади решетки конструктивными элементами. Обычному значению R = = 0,65 соответствует величина &=0,74, [а] для скоростей 0,75 *м/сек* потери напора составляют 0,02 *м.* Однако расчет должен быть проведен с учетом возможного заполнения части решетки сором. В практических случаях 25—50% площади очищаемых вручную решеток забиваются плавающими телами, что значительно повышает потери напора. Потери напора в правильно запроектированных водоприемниках обычно ничтожны и могут не учитываться в расчете.

3. Защита водоприемников от льда. При проектировании водоприемников, расположенных в холодном климате, часто бывает необходимо предусматривать мероприятия по защите сооружения ют льда. На рис. 52 показана схема, при которой можно ожидать ледовые затруднения, а на рис. 53 — схемы компоновки гидроузла, позволяющие уменьшить эти затруднения. На глубинных водоприемниках, верх которых расположен на глубине свыше 10 12 *м* под уровнем воды, ледовые затруднения практически исключены.

Ледовые затруднения могут иметь место от нескольких видов льда. Поверхностный лед, образующийся при замерзании воды, а также мельчайшие льдинки, плывущие по реке, накапливаясь, могут создать при малых скоростях течения устойчивый ледяной покров. При значительных же скоростях течения поверхностного льда не образуется. Поверхностный лед в виде отдельных льдин сбрасывается через водосбросы.

Другой вид льда — шуга — образуется в потоке при больших скоростях течения и движется по реке в виде рыхлых скоплений, которые обладают способностью примерзать к



Рис. 52. Расположение сооружений, при которых могут иметь место ледовые затруднения.

стен[Н]*ка*[ЗК]*б*[На] ппК схема’ отсутствует ледозащитная » прямой> воронкообразный подход к машин-
У зданию способствует образованию зажора.

охлажденным элементам конструкции. Этот вид,льда создает наибольшие затруднения.

Донный лед образуется в неглубоких водоемах при свободной ст льда поверхности воды. По своему воздействию на сооружение он аналогичен шуге.

Как правило, шуга и донный лед возникают при отсутствии поверхностного льда. Поэтому, если здание ГЭС расположено при водохранилище больших размеров, затруднения от этих видов льда сравнительно редки. Также не приходится ожидать затруднений, если водоприемник расположен в конце глубокого длинного канала при малых скоростях течения, допускающих быстрое образование ледяного покрова. При больших скоростях подхода потока к водоприемнику можно ожидать воздействия на него шуги и донного льда. Поскольку основные ледовые затруднения заключаются в обмерзании обтекаемых поверхностей, в ка-

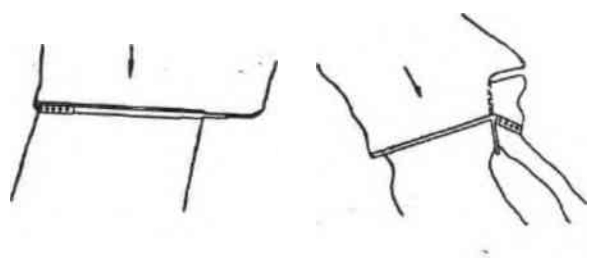
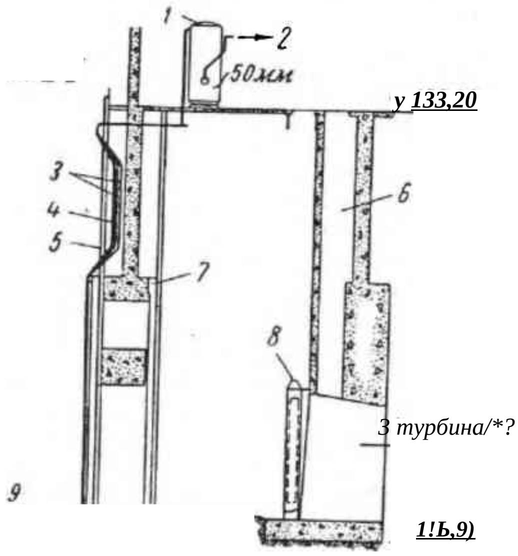


Рис. 53. Расположение сооружений, при которых могут, иметь место минимальные ледовые затруднения.

[а] больцсой бассейн перед ГЭС и глубокое приемное отверстие являются достаточной защитой; *б* — бассейн средних размеров и неглубокое приемное отверстие требуют установки запани.

честве основных мер защиты должны быть приняты такие, которые предупреждают такое обмерзание. В качестве основных мероприятий применяются: 1) обогрев решеток; 2) удаление льда сжатым воздухом; 3) удаление решеток на период шугохода.



Для обогрева решеток и других стальных конструкций, на которые может воздействовать лед, их размещают за забральной стенкой. Эта стенка, несколько заглубленная под уровень, препятствует доступу холодного воздуха к решетке. Теплый воздух поступает из машинного зала и обогревает концы решеток. В этих условиях • стержни решеток должны быть непрерывными сверху донизу для обеспечения переноса тепла до дна. В суровых климатических условиях этот метод неэффективен. На установке Ла Тюрк на р. Св. Морица решетки выступают выше воды, и по их верхним концам пропущены трубы, обогреваемые паром. Этим мероприятием задача борьбы со льдом была успешно решена.

■ В суровых зимних условиях, особенно в Швеции и Норвегии, нашел применение метод обогрева решеток почти исключительно электричеством.

При проектировании электрообогрева решеток стержни монтируются обычным образом с подключением к ним электрического тока от трансформатора. Аналогичным образом производится обогрел пазов затворов. При электрообогреве каждый стержень или группа стержней соединяются последовательно и через них пропускается ток. Опытом найдено, что для стержней, имеющих поперечное сечение 3 достаточный обогрев получается при величине тока 250—300 «на стержень.

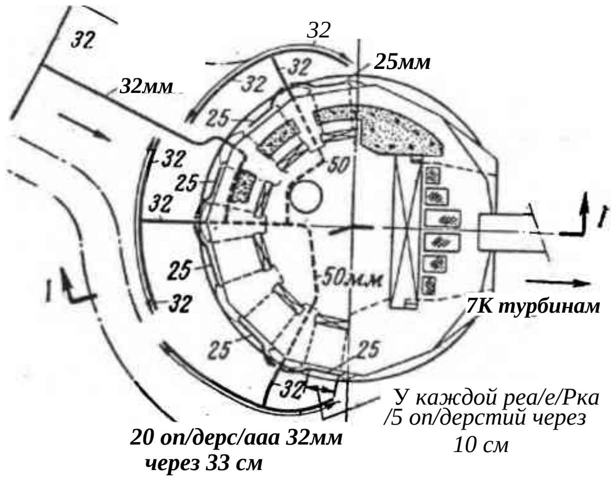


Рис. 54. Водоприемник Роки-Ривер с установкой для сжатого* воздуха.

к°мпрессоРУ>- 3~ стояки 25 .иле; тояки 32 мм, 5 — направляющие решеток- 6 — ачпя бьг Sa 7 ~~ горный паз; 5—Затвор; 9 Лру-‘ бы на Донных прокладках (цифры на плане водоприемника указывают диаметры труб).м

Особенно эффективно использование системы подачи сжатого воздуха для защиты от льда. Сжатый воздух под давлением, несколько большим, чем глубина воды, выпускается из перфорированной трубы перед решетками. Пузырьки воздуха поднимают частицы льда и заставляют их поступать в специальный водослив. Необходимое расстояние от низа решеток до трубы зависит от скорости течения, так как небходимо, чтобы пузырьки воздуха достигали поверхности еще песет н решеткой.

На установке Роки Ривер в Коннектикуте система сжатого воздуха вполне оправдала себя'; схема установки показана на рис. 54. Сжатый воздух подавался двумя компрессорами мощностью по 15 *л. с.* и компрессором ,*л*- *с. в* резервуар, давление-в кото’-ром поддерживалось 7 *ат,* откуда он поступал в разводящую линию с давлением 0,7 *кг!см*^{2}. Подобная же установка была (смонтирована на Г'рэНд-

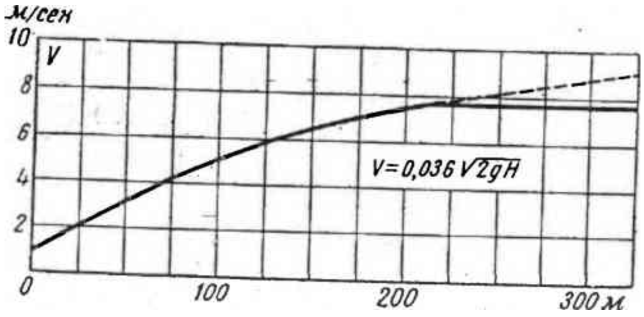


Рис. 55. Допустимые скорости течения во входных отверстиях.

Кули перед решетками и затворами водосбросов. Глубина воды в месте подачи воздуха колебалась от 3 до *Им. Воздух* подавался из отверстия диа- 3 мм- Всего было просверлено 4о0 отверстий при пролете водосливов 3,8 *м* и решеток 1,5 *м.* Производи*тель*ноеть каждого отверстия составила U, 10 *мР/мин* при давлении у отверстия 0,15 0,30 *кг/см*^{2}. Медные воздушные трубы в разводящей линии имеют диаметр 19 и 25 *мм.* Главные подводящие линии длиной 1 200 *м* выполнены из 100 *мм* гальванизированных стальных труб, обслуживаемых четырьмя компрессорами производительностью 10 *м²/мин* каждый при давлении 3 *ат.*

На большинстве современных ГЭС все решетки выполняются секционн* рованными для обеспечения удаления их при движении льда.

На рис. 55 дан график, по которому, зная напор над центром входного отверстия водоприемника, можно найти допустимую скорость течения воды во входном отверстии. При этом для напоров 200 *м* скорость не рекомендуется назначать свыше 7,5 *м/сек.*

4. Высоконапорные водоприемники. Высоконапорные водоприемники выполняются различных типов. Для водоприемников в бетонных плотинах и для низконапорных типов детали водоприемных сооружений мало отличаются друг от друга. Для земляных и набросных плотин водоприемники обычно выполняются в виде башни, расположенной у подошвы верхового откоса. Некоторые примеры водоприемников показаны на рис. 56___ 59. К сожалению, имеется очень мало данных об условиях работы водоприемной башни при давлении льда. На водоприемнике Девис Бридж (рис. 58)

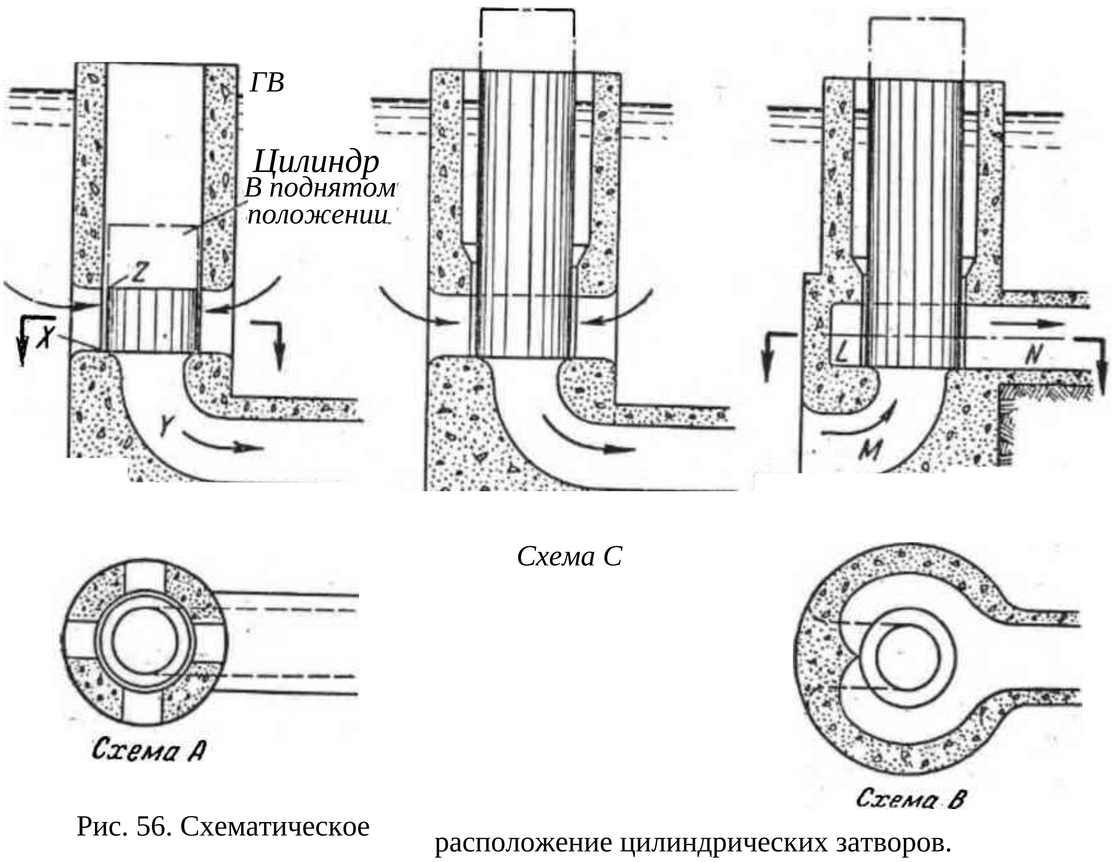


Рис. 56. Схематическое расположение цилиндрических затворов.

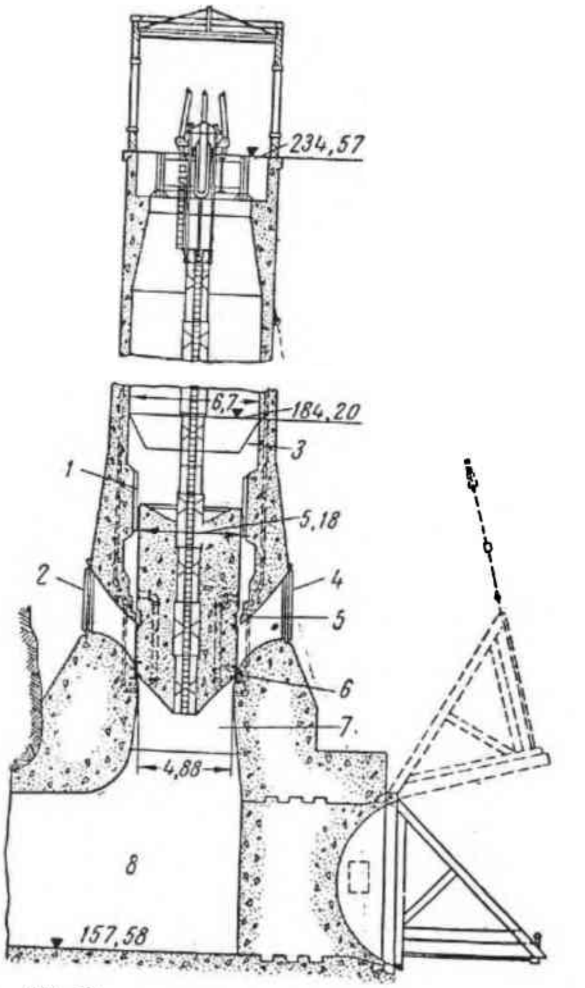


Рис. 57. Цилиндрический затвор Дикс Ривер.
1 — направляющие; *2* — решетки; *3* — отклонитель; *4* — решетки; *5* — верхний порог; *6* — нижний порог; *7* — стальная облицовка; *8* — туннель.

имеются два параллельно поставленных затвора, расположенных в нижней части башни; фильтрация через затворы должна быть полностью предупреждена.

15. ВОДОСБРОСНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Плотины всех гидроэлектростанций снабжены водосбросами для удаления избыточного притока из водохранилища, который не может быть пропущен через турбины или аккумулирован.

Водосбросы выполняются с поверхностным сбросом воды, сифонными или донными. Подъем уровня в.водохранилище может быть допущен до ограниченных пределов, определяемых затоплением; водосливные устрой’ства предупреждают возможное повышение уровня сверх допустимого. Это вызывает некоторую потерю напора, который мог бы быть использован для выработки энергии. Для снижения этой потери увеличивается длина водослива или же располагаются на его гребне затворы, регулирующие уровень/ Очевидно, что необходимость тщательного контроля Уровня особенно велика для низконапорных установок.

Выбор типа водосброса зависит от топографических, геологических и гидрологических условий в створе гидроузла. В некоторых случаях преимущество определенного типа водосбросов очевидно, но обычно на начальной стадии проектирования необходимо сравнение различных типов водосбросов Определение вероятной стоимости массивной водосливной плотины не столь, сложно, но учет, всех экономических характеристик отдельных типов водосбросов является затрудненным. Помимо определения капиталовложений в технико-экономическом расчете' должны быть учтены и эксплуатационные расходы. Ниже рассматриваются условия применения различных типов водосбросов.

1. Береговые водосбросы. В верхнем бьефе некоторых плотин могут быть одна или несколько естественных лощин или седловин, примыкающих к урезу воды в водохранилище и удаленных от основного сооружения. В этой пониженной зоне может быть устроен водосброс при сравнительно небольших затратах. Типичная схема показана на рис. 60. Кроме того, расположение водосброса за пределами основных сооружений может резко^ упростить конструкцию плотины. Во многих случаях стоимость водосброса,, устраиваемого таким образом, ничтожно мала по сравнению, со стоимостью основных сооружений. Для плотин, на которых водосбросы могут включаться в работу лишь 1 раз за много лет, устройство таких водосбросов исключительно эффективно. При большом удалении от основных сооружений размыв ниже водосброса является совершенно безопасным.

Такой ^водосброс, не связанный с плотиной, расположен нормально к ее оси и имеет обычно длинный» сбросной канал—быстроток со сравнительно большим уклоном, по[1] которому вода отводится в нижний бьеф.

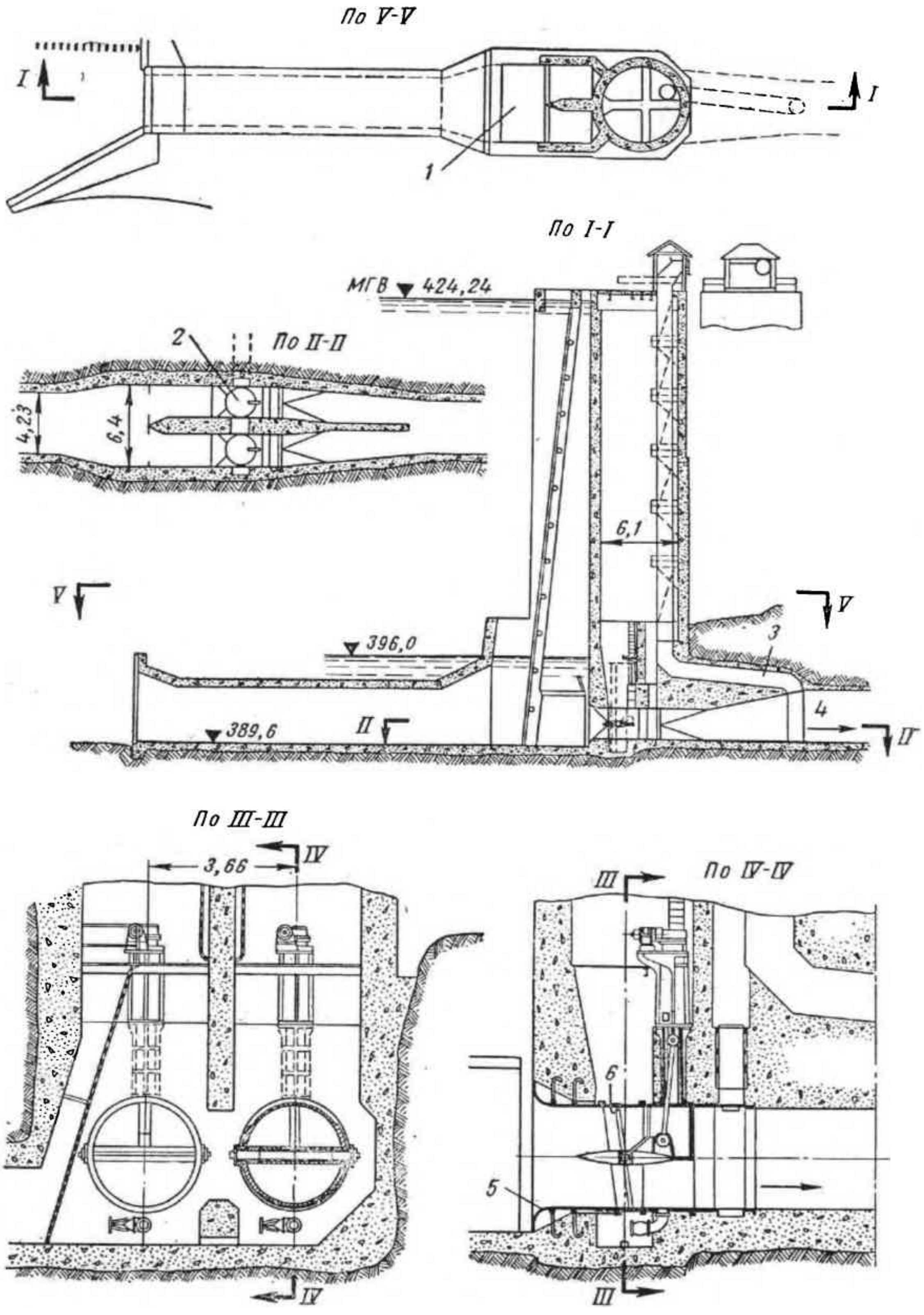
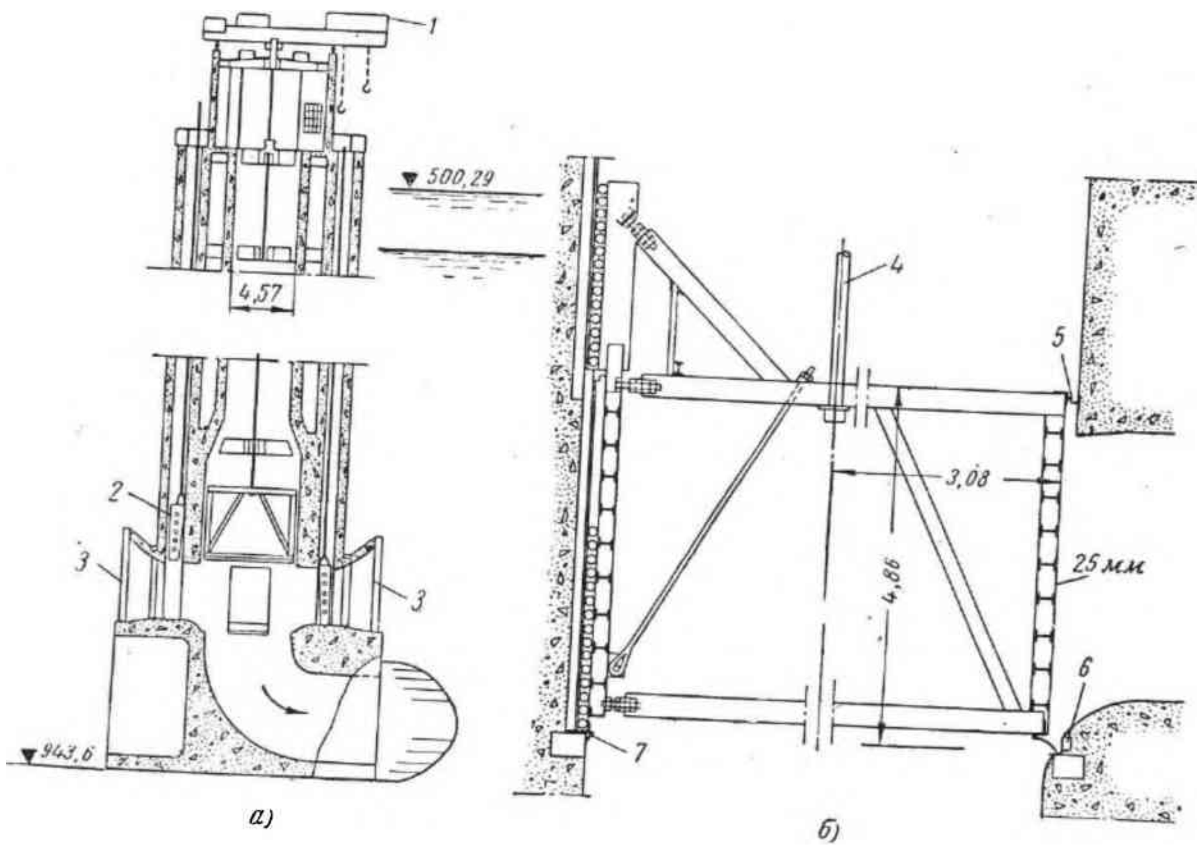


Рис. 58. Высоконапорный водоприемник Де вис Бридж.
1 - решетки; *2* - дисковые затворы 2 x 2,45 *м; 3* - воздушная труба Е2 *м; 4* — туннель; *5*— чугунная облицовка; *6* —баббитовая опора.

Гребень водосброса может быть прямым, как на рис. 61, или выполненным в виде арки, что в некоторых случаях более желательно. В тех случаях, когда гребень водосброса не является водосливом с широким порогом, его целесообразно выполнять с практическим профилем. Потребная дли^а гребня является объектом экономического расчета, поскольку высота плотины растет с уменьшением длины водосброса, который имеет наиболь-



6 — воздуховод; *7* — нижнее уплотнение. ’ 5 ~~ рхнее Уплотнение;

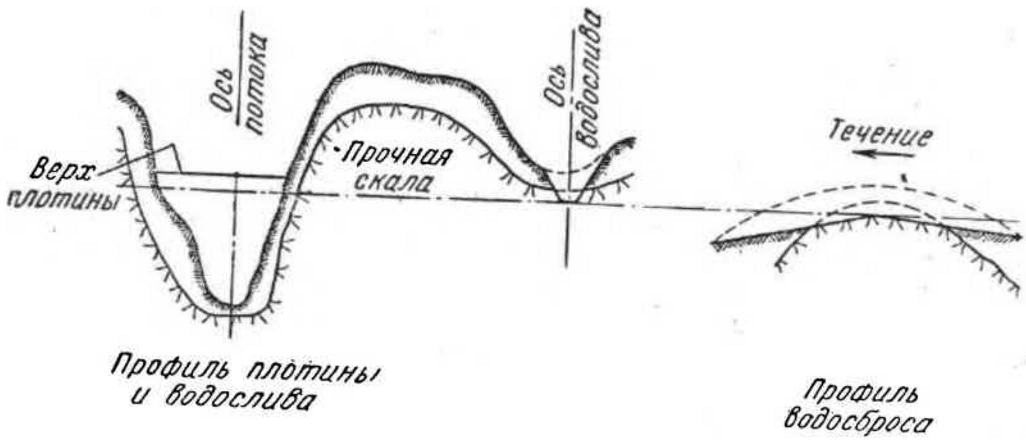


Рис. 60. Пример берегового водосброса в плотной скале.

шую ширину по гребню и затем сужается до наиболее экономичного сечеНИЯ сбросного канала. Конечный участок водосброса оформляется иногда в виде расширения для уменьшения удельной энергии сбрасываемого потока.

Движение воды в каналах-быстротоках представляет собой одну из форм неравномерного движения с большими

тока “ " С сильной аэрацией по-
, вызывает увеличение живо-

го сечения. Для проектирования быстротока может быть рекомендован последовательный расчет от сечения к сечению [Л. 18]. учения

Для каиада без увлечения воздуха д я двух створов обозначим (рис. 62):

Q — расход, *лг[сек-,*

Ь — ширина свободной поверхйости;

— ширина Канала по дну;

h — глубина воды в канале;

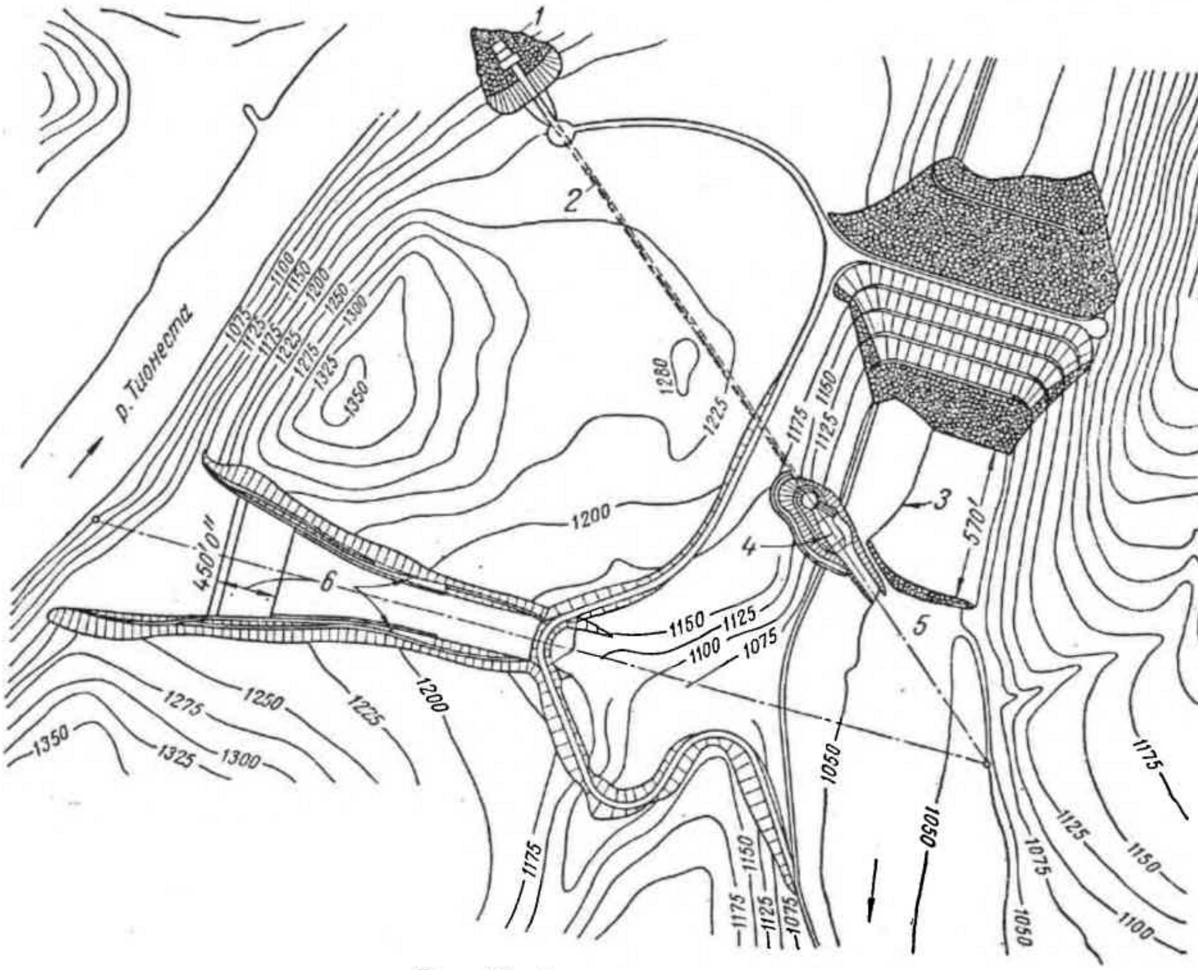


Рис. 61. Водосброс Тионеста.
1 — водоприемник; *2* — туннель; *3* — русло; *4* — гаситель; *5* — наброска; *6* — водосброс.

5—-котангенс угла наклона боковых стенок канала при трапецеидальном сечении;

площадь поперечного сечения канала;

— гидравлический радиус;

n коэффициент шероховатости;

коэффициент увлечения воздуха?, по табл. 4 (увеличение коэффициента шероховатости).

Пои условии вовлечения воздуха применяется индекс *a*.

ных и^пьп„ИраТсязн?чение п для обыч- у без учета увлечения воздуха, а также значение *k* из табл. 4 Ли,; ,Находятся место перелома профиля быстротока, устраиваемого обыч-

значения $^4T_п$ 0пределяются при отсутствии вовлечения воздуха.

Для прямоугольных сечений

$$h=\sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{b^2 g}} \quad (42)$$

Для трапецеидальных сечений

$$Q\sqrt{\frac{\alpha}{g}}=A\sqrt{\frac{A}{b}}. \quad (43)$$

3. В точке перелома вычисляется значение р отношения объема воды

Таблица 4

Рекомендуемые значения для коэффициента увлечения воздуха [Л. 19J

Характер поверхности	Значения &
Деревянные лотки без планок гладкая цементная штукатурка или металл	0,003—0,004
Цементный раствор или средний бетон..................... г	0,003—0,004
Грубый бетон или гладкая каменная кладка	0,004—0,006
Грубая каменная кладка* или гладкая булыжная кладка на цементном растворе	0,008—0,'012
	0,015—0,020

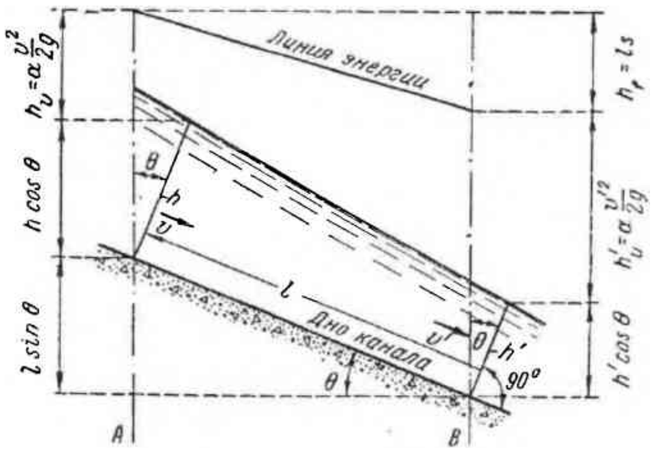


Рис. 62. Схема расчета быстротока.

к общему объему воды и воздуха из выражения

л——— 1
P , I k V² ‘ (44)

4. Подсчитываются фактические значения A_a, R_a и h_a с учетом вовлечения воздуха.

Для прямоугольных сечений

= (45)

Для трапецеидальных сечений

-Ьх + K ftf(4SQ/p_W)
Л« =------------ 2S----------• (45а)

5. Для точки перелома вычисляется значение n_e эффективного коэффициента шероховатости из уравнения

$$n_e = n\left(\frac{R}{R_d}\right) \quad (46)$$

6. Быстроток делят на несколько участков длиной /, принимая малые значения *I* при быстром возрастании скоростей и большие значения при равномерном течении. Для каждого участка вычисляются значения *A, R, v,* р, n_e, A_a, R_a для начального и конечного створов расчетного участка.

7. Для нижнего створа расчетного участка принимается пробное значение *h'* и вычисляются *R', v'* и n_e . Для облегчения вычисления могут быть заранее построены кривые для разных глубин.

8. Вычисляются средние значения величин *R* и *R', v* и *v', n_e и n_e* между сечениями расчетных створов данного участка.

9. При средних значениях находятся средний уклон линии энергии S и потери энергии /S между сечениями.

10. Из уравнения Бернулли находится глубина в нижнем створе, которая должна соответствовать предварительному значению, найденному выше (п. 7). При несоответствии глубин делается второй расчет для их сближения. Определение глубин ведется по каждому участку до конца канала до тех пор, пока .линия энергии не становится параллельной дну канала.

И. После того как просчитаны все участки, находятся величины *1$г_a$,* что и определит положение водной поверхности с учетом увлечения воздуха.

2. Шахтные и сифонные водосбросы. Шахтные водосбросы состоят из вертикального сбросного туннеля с оголовком, оформленным в виде водослива. Вертикальная шахта сопрягается под углом с отводящим туннелем, по которому сбрасываемая вода удаляется в нижний бьеф. В проектной практике приняты два типа оголовков шахтных водосбросов: один — с очертанием гребня по водосливу практического профиля, другой—в виде водослива с широким порогом. Сравнение их дано на рис. 63. При оголовке в виде водослива с широким порогом водосброс состоит из входной конической части и вертикальной шахты, которая при расчетном расходе полностью заполнена водой. Ниже вертикальной шахты расположены колено и горизонтальный водовод. В водосбросе с очертанием оголовка по водосливу практического профиля схема остается без изменения, за исключением водосливной секции, в которой вода начинает свободное падение немедленно после перехода через гребень водослива. Очертание водослива практического профиля имеет известное преимущество ввиду меньшего диаметра оголовка и большего коэффициента расхода. Этот тип оголовка чаще применяется прй башенных водосбросах. Однако при водосливе с плоским гребнем воронка имеет меньший диаметр, и поэтому эта .

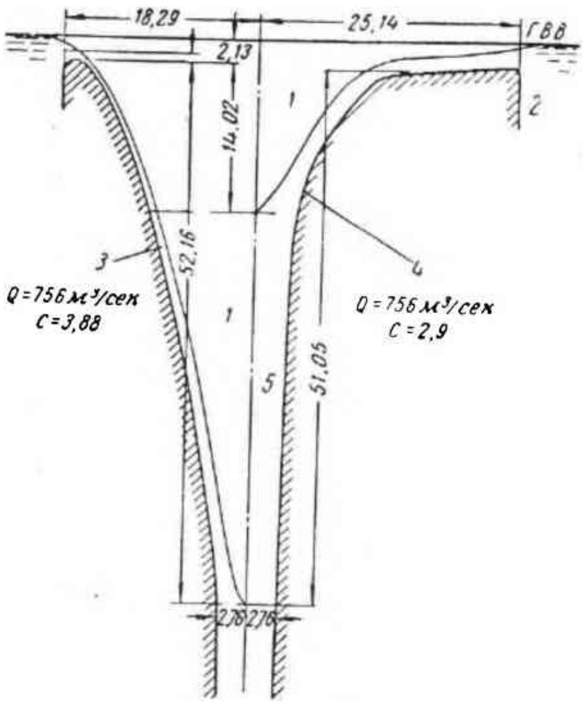


Рис. 63. Сравнительная схема оголовков шахтного водосброса.

воронка; *2* — водослив; *3*— водослив практического профиля; *4*— водослив с широким порогом; *5* — вертикальная шахта.

схема предпочтительна при размещении водосброса в скале. Вертикальная шахта при водосливе практического профиля обычно имеет несколько меньший диаметр в связи с повышенным скоростным напором в ее начале.

В большинстве случае расчет шахтного водосброса дает лишь приближенную картину его работы, и потому в ответственных случаях необходимо проведение лабораторных испытаний.

Сифонные водосбросы используют напор, созданный плотиной, для получения более высоких скоростей течения в сравнении с открытым водосливом и позволяют увеличить удельный расход водосброса. На рис. 64 показан стандартный тип сифонного водосброса. Вакуум, возникающий в верхней части сооружения, обеспечивает пропуск необходимых расходов. Специальные воздушные трубы регулируют подачу воздуха в водосброс, и при большом его расходе работа сифона может прекратиться. Выходное отверстие сифонного водосброса -может быть затопленным и незатолленным. Сифонный водосброс включается в работу при превышении уровня воды в верхнем бьефе над его гребнем примерно на 10—12 *см.*

Имеются примеры выполнения сифонных водосбросов с пропускной способностью до 500 *м³/сек*, при разности уровней между верхним и нижним бьефами свыше 50 *м.* Проектирование этих сифонов довольно сложно. Проектировщик должен быть уверен, что нисходящая ветвь сифона сделана достаточно малого диаметра для создания необходимых сопротивлений и предотвратит образование вакуума. В работе сифона имеет место интенсивная вибрация; во всех ответственных случаях целесообразно проводить лабораторные испытания.

Расходы сифонного водосброса вычисляются по обычным уравнениям движения потока, как для течения в коротких трубах. Коэффициент расхода меняется от 0,25 до 0,98. Для водосброса, показанного на рис. 64, коэффициент расхода равен примерно 0,65.

3. Аварийные водосбросы. Под аварийным водосбросом понимается такое сооружение, которое работает настолько редко, что нет необходимости защищать его водосливную грань, основание, или отводящий канал от разрушений, которые возникают при вступлении водосброса в работу.

Аварийный водосброс представляет собой вспомогательное сооружение, которое включается в действие только тогда, когда наступает паводок с обеспеченностью, меньшей, чем расчетная, на которую были рассчитаны основные

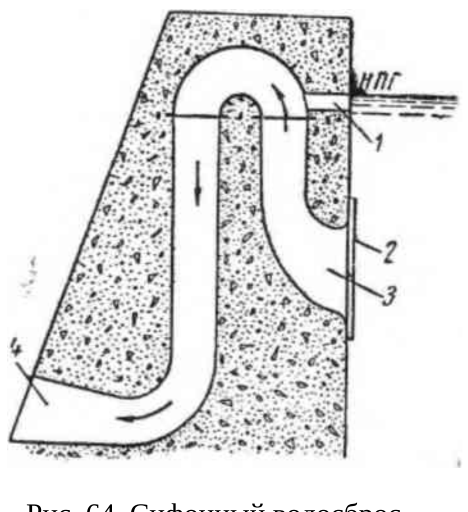


Рис. 64. Сифонный водосброс.

1 - воздушный клапан; *2* — решетки; *3* — *вход- 4 - выход.*

водосбросы. С этой точки зрения этот водосброс является резервным сооружением.

В этом случае постоянный водосброс будет рассчитан на пропуск 60 80%, расхода расчетного паводка, а аварийный водоброс примет на себя остаток, создав полную гарантию безопасности основного сооружения.

Аварийный водосброс наиболее удобно располагать в заливе или рукаве, образованном водохранилищем. I ребень его размещается на отметке максимального уровня воды в верхнем бьефе, соответствующего безопасной работе плотины, с учетом воздействия волн. При отсутствии боковой долины, по которой может быть осуществлен сброс воды, возможно прорытие специального канала. В слабых грунтах достаточно прорыть пионерный канал, с тем чтобы вода произвела сама нужное расширение. При этом должна быть принята во внимание опасность разрушения склонов водоотводящего тракта.

16. ЗАТВОРЫ СБРОСНЫХ И ВОДОПРИЁМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Устройства, используемые для регулирования уровня воды в водохранилище, . могут быть разделены на следующие . гр упп ы:

- . 1... Устройства, позволяющие изменять отметку гребня водослива при изменении расходов воды в реке.

■2; Устройства в виде затворов на гребне, которые открываются и закрываются в зависимости от расхода воды.

3. Плоские или другие затворы, помещенные в донных отверстиях плотины. Через эти отверстия сбрасывается также строительный расход.

Из всех этих устройств наиболее широко используется прием установки затворов на Гребне водосливов. Термин «затворы на гребне» служит для обозначения целого класса затворов, в которых напорная поверхность поднимается для того, чтобы пропускать расход между нижней кромкой и гребнем водослива. Эти затворы опираются на бычки, расположённые на равных расстояниях вдоль гребня плотины, и управляются или подъемным краном, или со специального моста. Затворы устраиваются таким образом, чтобы ооеспечить полное открытие пролета плотины для пропуска льда и плавающих тел.

Плоские затворы применяют для малых пролетов на небольших ГЭС. В некоторых случаях они выполняются из дерева. Секторные затворы типа «тэйнтор» выполнены в виде сегмента или сектора, в котором по металлической несущей конструкции укладывается деревянная обшивка напорной грани. Затворы поднимаются обычно с помощью тросов или цепей, закрепленных по обоим концам затвора. При подъеме затвора приходится преодолевать лишь очень небольшие усилия в опорах. Уравновешенные секторные затворы могут работать автоматически.

Цилиндрические самовкатывающиеся затворы представляют собой цилиндрическую балку, перекрывающую пролет, к которой прикреплена напорная грань затвора. Затвор вкатывается по специальным устройствам, расположенным на балках. Подъемное усилие прикладывается обычно с одной стороны затвора. Напор, воспринимаемый затвором, определяется диаметром цилиндра и высотой козырька.

Для сброса воды из водохранилища используются два класса донных затворов. Первый класс служит ДЛЯ” перекрытия тех сбросных отверстии, которые работают редко или периодически и .используются лишь В двух положениях — при полном закрытии И полном открытии. Второй тип служит для поддержания определенного расхода через сбросное отверстие переменного сечения. Для малых напоров используются все типы затворов. Для больших напоров и точного регулирования величины сбросов используются специальные затворы.

Конструкция затвора определяется условиями его работы. Резкое изменение .скорости истечения и действующего на затвор давления происходит при его открытии. При этом возникают кавитационные явления за затвором, а в отдельных точках — и отрицательное давление. Неправильное очертание

входных кромок затвора может вызвать его повреждение. Вход в отверстие, перекрываемое затвором, должен быть очерчен по возможности .плавно для обеспечения минимума гидравлических потерь. За затвором неизбежно возникает изменение сечения, поэтому бетон ниже затвора должен быть облицован металлическими или чугунными плитами. Облицовка должна быть тщательно заанкерена в бетон, а бетон за облицовкой должен быть уложен с особой тщательностью.

Если уровень в нижнем бьефе высокий, то максимальная 'пропускная способность отверстия будет наибольшей при расположении его под этим уровнем, однако в этом случае затвор недоступен для осмотра. Если же затвор располагается выше уровня в нижнем бьефе, то теряется часть напора, от которого зависит пропускная способность водосброса, и пазы затвора могут подвергнуться обмерзанию в зимнее время. При достаточно больших колебаниях уровня нижнего бьефа затвор может быть расположен под поверхностью воды, которая соот-. Бегствует обычным условиям работы водосброса. Опасность обмерзания в этом случае может быть предупреждена временной защитой выходного отверстия. На рис. 65 изображен типичный донный водоспуск, закрытый дисковым затвором. Затворы, этого типа применяются обычно в массивных плотинах с донными отверстиями, дополнительно защищенными затворами с верховой стороны.

Входные отверстия затворов обычно защищены опорными балками решеток, как показано на рис. 48, с расстоянием между ними, равным примерно [1]/з наименьшего открытия затвора. Однако некоторые бревна и деревья, остановленные решетками, могут пройти через них и помешать закрытию затвора, если решетки расположены слишком близко к нему. Для глубоких водохранилищ решетки не ставятся. В некоторых случаях предусматривается специальное уплотнение верхней части щита для^облегчения ремонта. При больших глубинах воды для ремонтных условий предусматривается установка дублирующего затвора.

Поскольку в потернах плотин имеется значительная влажность, все подъемные устройства затвора необходимо тщательно контролировать. Наилучшими являются масляные подъемники. Колесные и гусеничные затворы обычно приводятся в действие с помощью кабеля. Это облегчает маневрирование, ^когда затвор расположен на наружной грани плотины. Если затвор расположен внутри плотины, то для обеспечения качественного уплотнения между затвором и камерой управления целесообразно устраивать жесткие тяги. Если затвор не располагается на водосливной секции плотины, а также

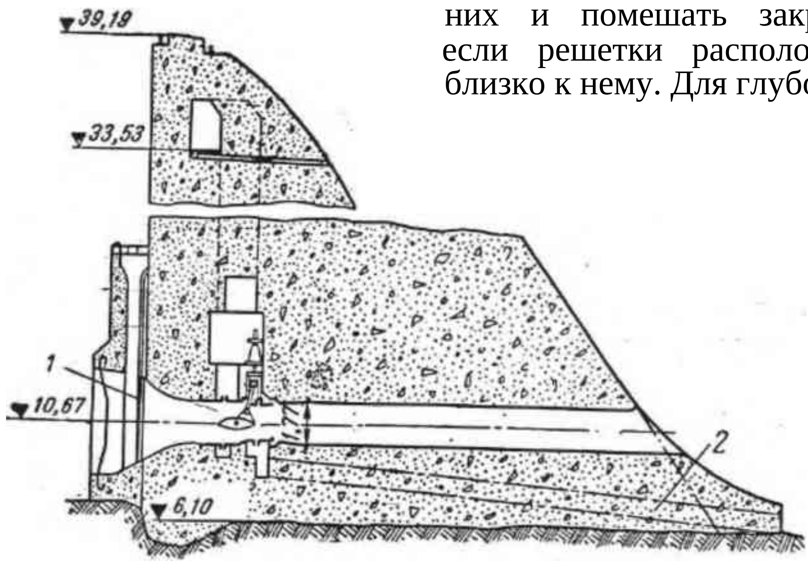


Рис. 65. Установка с донными водосбросами.
1 — пазы затворов; *2* — дренажная галерея.

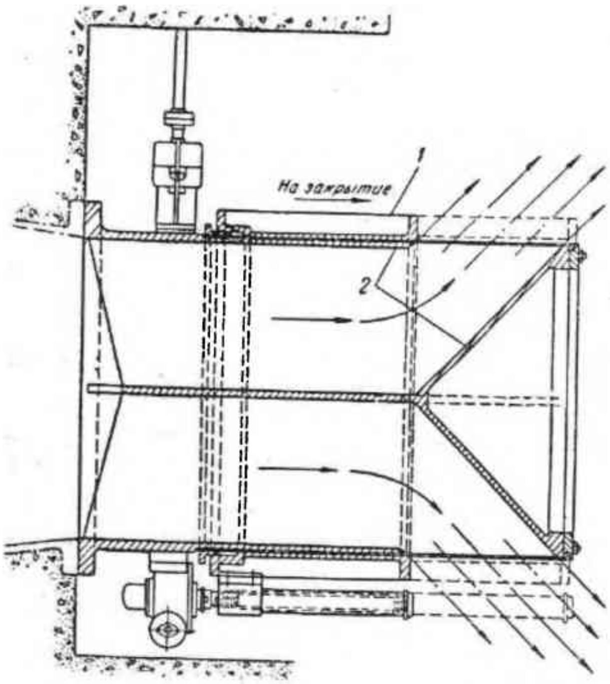


Рис. 66. Затвор Ховел Банджер.
1 подвижная часть; *2* — неподвижная часть.

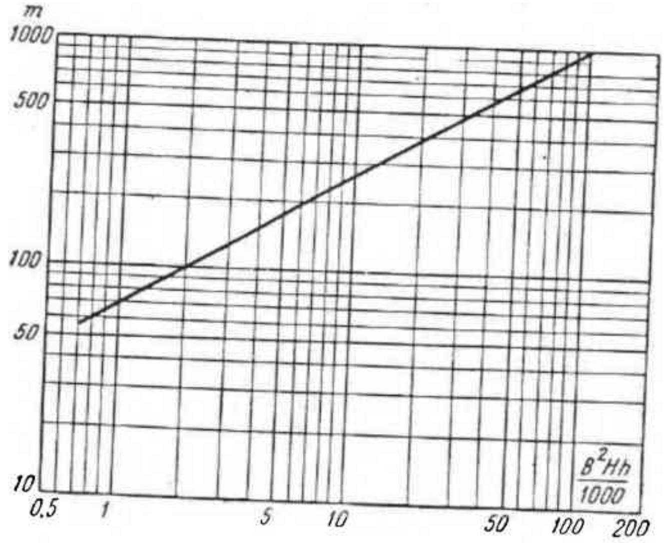


Рис. 67. Веса цилиндрических затворов.

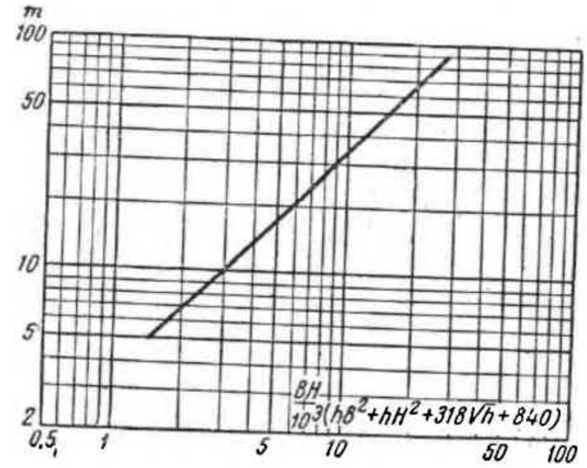
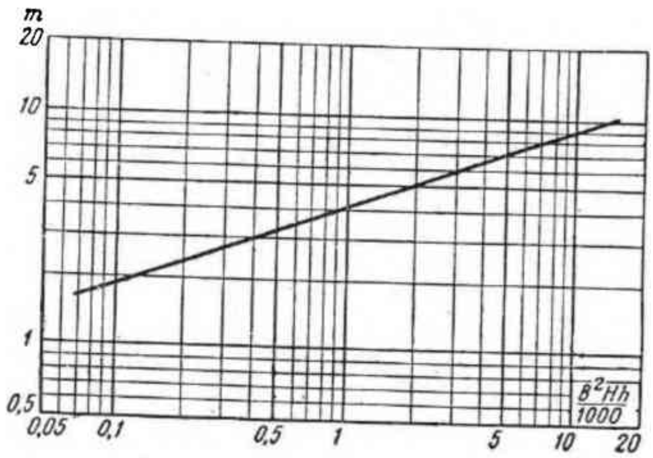


Рис. 68. Вес.г скользящих затворов с гидра влическим приводом.



Рии. 69. Веса секторных затворов.

в тех случаях, когда позволяют конструктивные и эксплуатационные условия, наилучшим расположением затвора является установка его в конце водосбросного тракта. При этом избыточная энергия воды гасится за пределами сооружения; затвор подвержен полному давлению воды, что требует качественного уплотнения. Для этих условий может быть использован затвор типа Ховел-Банджер (рис. 66). Затвор' состоит из неподвижного ци=-линдрического корпуса с коническим низовым концом и гидравлически сбалансированного цилиндрического затвора. Конический выход обеспечивает рассеяние струи, что дает гашение энергии струи на большом протяжении и не влияет на работу сооружения.

Для расчетов на предварительной стадии проектирования возникает необходимость определения веса затворов по их габаритам.

На рис. 67—72 даны веса затворов различных типов по фактическим данным [Л. 20]. На графиках приняты следующие обозначения:

B — пролет затвора в свету,

H—высота затвора в свету, *м*\

h — напор в центре затвора, *м.*

Все веса даны в тоннах.

Для плоских затворов дан вес как самого затвора, так и его закладных частей, включая облицовку отверстия и гидроподъемника. Для секторных затворов (типа Друмгейт) и сегмент-

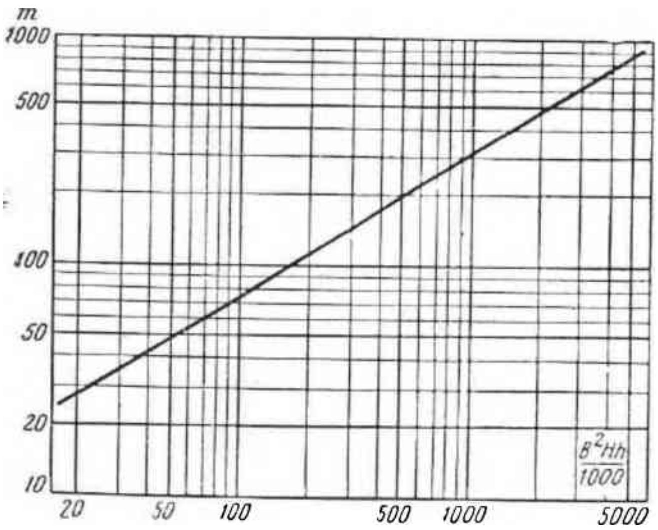


Рис. 70. Веса колесных затворов и затворов Стонея.

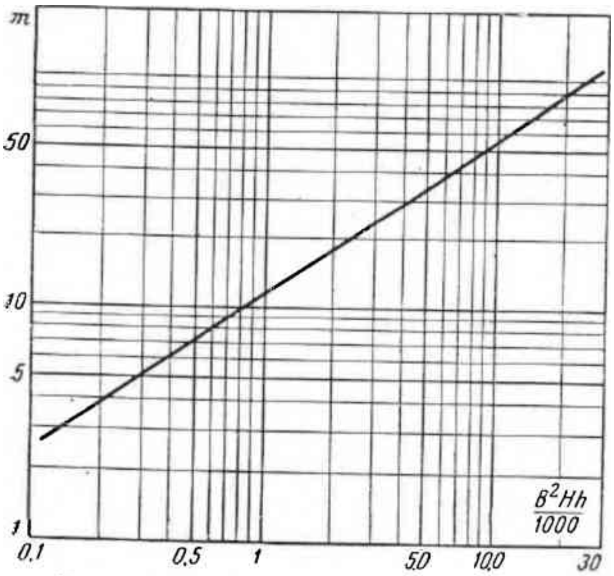


Рис. 71. Веса гусеничных затворов.

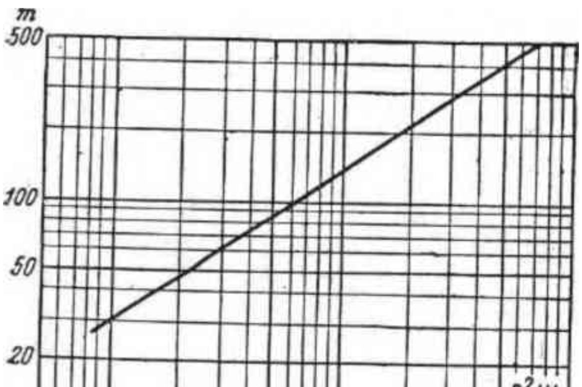


Рис. 72. Веса вальцовых затворов.

них (типа Тейнтор) в общий вес включены веса закладных частей. График для колесных затворов может быть использован также для затворов Стонея.

Графики для гусеничных и вальцовых затворов учитывают также и вес закладных частей. Веса подвесок, штанг, труб, реек и подъемных механизмов графиками не учитываются.

Тип затвора для водоприемников зависит от размера отверстия, действующего напора и условий эксплуатации, а именно:

1. Затвор должен закрываться и открываться при полном рабочем напоре и свободном истечении через водоприемник.

2. Затвор должен работать только после наполнения трубопровода с помощью вспомогательной трубы заполнения, причем напор на затворе составляет лишь небольшую часть рабочего напора.

Скользящие затворы дают минимальную фильтрацию и применяются при различных напорах для подъемных усилий свыше 35 *т*. Эти затворы наиболее экономичны для малых напоров и средних размеров. Во многих случаях рядом с основным затвором располагаются шандоры. Колесные за-

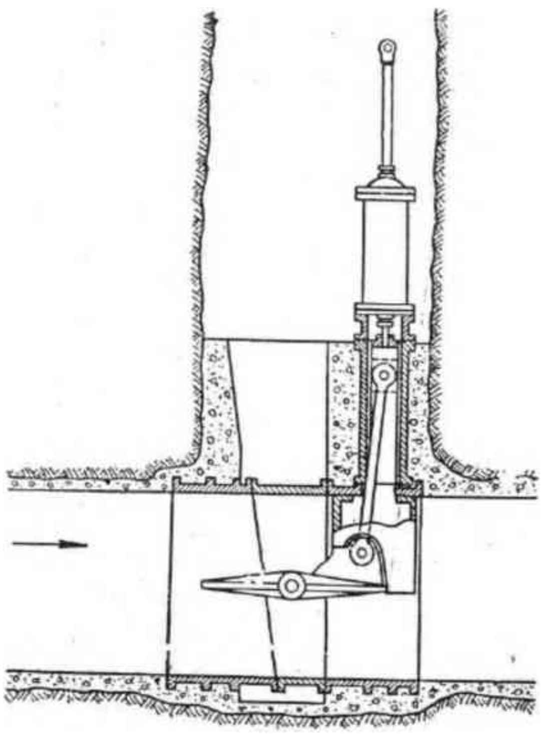


Рис. 73. Дисковый затвор.

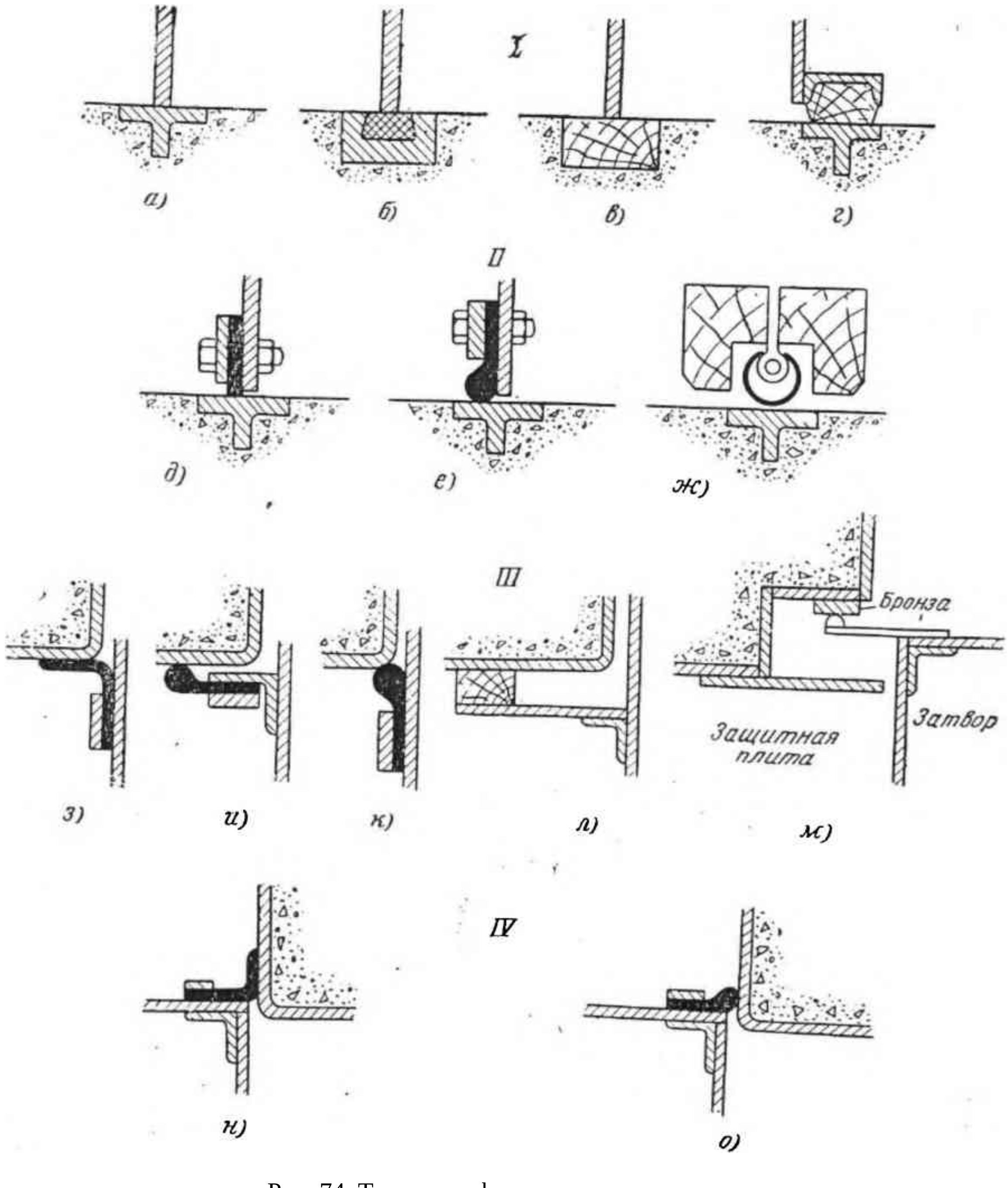


Рис. 74. Типичные формы уплотнения,
— прямые донные; *II* — гибкие донные; *III* — гибкие боковые* *л/* .
боковые, *IV* — гибкие торцовые уплотнения.

творы очень удобны в эксплуатации, однако в них крайне затруднена борьба с фильтрацией.

Наиболее часто и успешно для низконапорных водоприемников, а также для сбросных отверстий применяются затворы типа Стонея.

Во многих 'случаях удобно использовать секторные затворы, которые применяются тогда, когда колебания уровня воды в верхнем бьефе ограничены. Однако в этом типе затворов трудно обеспечить водонепроницаемость бокового уплотнения.

Дисковые затворы могут быть использованы или в головной части трубопроводов, или непосредственно перед турбиной (для высоконапорных ГЭС), тот тип затворов может быть сделан водонепроницаемым при оформлении специальном образом контура сопряжения. Дисковые затворы могут быть применены при любых напорах и размерах. На установке Коновинго входные затворы имеют диаметр 8,23 *м* и’ расположены у входа в спиральную камеру. Затворы большего "диаметра до сих пор не встречались.

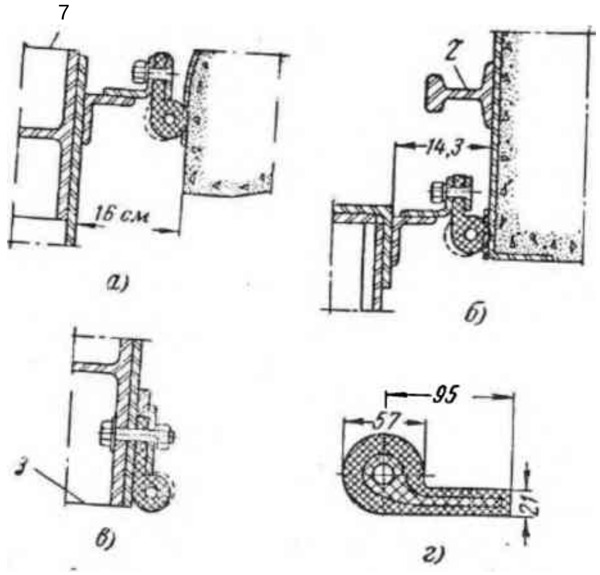


РИС. 75. Уплотнения затворов на установке . Чикамауга.
рх затворов, *2* рельс затвора; *3*—низ затвора.

Интересный проект дискового затвора дан на рис. 73, на котором подъемный рычаг прикреплен к низу чечевицы, что облегчает маневрирование затвором. Затворы могут управляться как вручную, так и автоматике- ски.

Цилиндрический затвор представляет собой вертикальный цилиндр, рас положенный в башне водоприемника, который, опускаясь и поднимаясь, обеспечивает необходимую величину открытия.

Основным вопросом конструирования затворов является устройство уплотнений, от качества которых зависит работа всего сооружения. Типы уплотнения могут быть самыми разнообразными. Так, на рис. 74 показан хороший способ осуществления плотного контакта с пазами с помощью наплавов баббита. Деревянные уплотнения щают хороший результат, если дерево постоянно увлажнено.

,™„Рук"и.

■конструкц^и ИбоЛее С0ВеРшенные типы

ГЭС

Для расчета тяговых усилий кл™

УпрХКнТяИИфо™Ро1йдаРИМеНЯеТСЯ

$$F = 1\,000\,HAK\,zt\,W, \quad (47)$$

где *F* — тяговое усилие, необходимое для маневрирования затворами, *кг*,

А площадь затвора, *м²;*

~~ напор над центром тяжести площади, *м'*,

К— коэффициент трения покоя-

и/—вес затвора с поправкой’ на взвешивание, *кг.*

Да в начале турбинного трубопрово- устпоТ™РУТЯ воздУхопоДводящие ВУпХ пп ’ ОбеЙеЧИВаЮЩте быстрый шаяи ™ ДуХа' Для определения пло- Щ ди поперечного сечения всзз воздухо- ■подводящей трубы может быть --- и с - пользована формула

$$'f —— "бДЙЙЩС \ t) /£\3/> \quad (48)$$

Де Q максимальный расход воздуха в аэрационной трубе, *м*1сек;*

— коэффициент расхода входного сечения (0,5—0,7);

площадь живого сечения ж²;

t — толщина стенок трубопровода, *м*\

^ — диаметр трубопровода, *м*-

— коэффициент запаса, принимаемый равным 5 — 10 в зависимости от места прокладки трубопровода.

ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ДЕРИВАЦИОННЫЕ СООРУЖЕНИЯ[1]

17. КАНАЛЫ

Необлицованные каналы. Типы каналов очень разнообразны (рис. 76). Земляные каналы имеют обычно трапецеидальные сечения; каналы в скале выполняются с почти вертикальными откосами в зависимости от угла естественного откоса разработанной скалы. Подпорные стенки на канале по схеме на рис. 76,в применяются тогда, когда нет достаточного места .для насыпи. Стенка на схеме на рис. 76,г представляет собой по существу небольшую плотину. Для этого случая очень опасно давление льда, и в практике эксплуатации таких сооружений отмечено несколько аварий. Для предупреждения разрушения сооружения на гребне плотины установлены затворы, прогибающиеся при расширении и сжатии льда.

Откосы необлицованного канала определяются углом естественного откоса стенок канала под водой. Так, например, в лёссе канал может 'быть отрыт с откосами крутизной 1 :0,5 в сухом состоянии, но при соприкосновении с водой стенки оплывают, откос становится более пологим.

Как правило, откосы в выемке могут выполняться более крутыми, чем в насыпи. Так, на рис. 76,*а* показано, что 'материал выдерживает подводный откос 1 : 1,5. В то же время для насыпи этот уклон должен быть не менее 1:2. Для водопроницаемых материалов — песчано-гравелистых или сильно песчаных грунтов—разница в откосах для мокрого и сухого состояний несущественна.

Откосы целесообразно выполнять наиболее крутыми. Для каналов в скале предпочтительны вертикальные или почти вертикальные откосы; для плотных глин устойчивый откос сохраняется при уклоне 1:1; для слабых, неуплотненных глин следует применять наиболее пологие откосы. Песчаные откосы обычно не делаются круче 1 : 1,5 или 1 : 2.

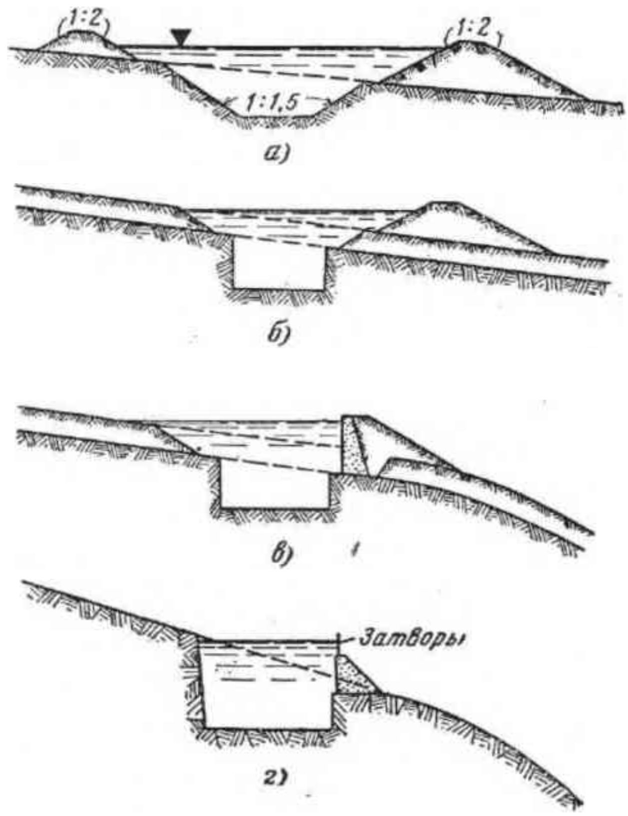


Рис. 76. Различные типы каналов.

Каналы ГЭС, как правило, снабжаются облицовкой. Некоторые соображения по сравнению облицованных и необлицованных каналов, а также по конструкциям облицовок приведены ниже.

а) Расчетные скорости течения. Скорость течения в канале должна быть меньше размывающей скорости для грунтов канала. Цели эта скорость невелика и устойчивость откосов обеспечена, то устройство облицовки находится под сомнением. Облицовка может оказаться необхо-

[1] В гл. 7 перевода вошли гл. 29—32 оригинала. В отечественной литературе вопросы проектирования деривационных сооружений и напорных металлических трубопроводов освещены достаточно подробно, поэтому в перевод вошли лишь те разделы глав, которые характеризуют конструктивные, производственные и эксплуатационные элементы, апробированные американской практикой. Полностью исключена глава о деривационных лотках. Глава «Деревянные трубопроводы», как не дающая ничего нового по сравнению с первым изданием Справочника, переведена частично, только в части практических рекомендаций.

Димой, когда уровень грунтовых вод находится ниже дна канала и возможны потери на фильтрацию.

Эксплуатационные условия канала определяются величиной незаиляющих скоростей. Величину минимальной скорости течения в канале ГЭС рекомендуется назначать выше незаиляющей.

Однако это ограничение не всегда должно приниматься во внимание, поскольку, как правило, водоприемники энергетических каналов располагаются в нижнем конце водохранилища или бьефа, в которых оседает часть наносов, поступающая из реки, что количество переносимого потоком твердого расхода выпадает в водоеме в непосредственной близости от места водозабора. Только часть мелких фракций наносов поступает в канал в определенные периоды его работы при малых нагрузках ГЭС, может оседать. Однако при увеличении нагрузки ГЭС и расхода в канале осевшие частицы наносов уносятся потоком.

Для песка и гравия транспортирующие и размывающие скорости мало отличаются от друга друг. Так, если крупный песок или гравий оседает в канале, то как только происходит увеличение скорости воды сверх той, при которой материал оседал, песок и гравий вновь поднимаются и переносятся потоком. В то же время, если откладывается глина или ил, нужно резко увеличить скорость для того, чтобы добиться размыва. Обычно скорость в 0,6—0,9 *м/сек* бывает достаточной для предохранения канала от заиления.

В некоторых климатических условиях особое значение приобретает рост водной растительности. Было отмечено, что при температуре воды ниже 18° С рост растительности незначителен. Растительность также не появляется в мутной воде при больших глубинах. Средней скорости порядка 0,75 *м/сек* достаточно для предохранения канала от зарастания.

Максимальной допустимой скоростью в канале является та, при которой не имеет места размыв дна и откосов канала. Обычно эта лимитирую-

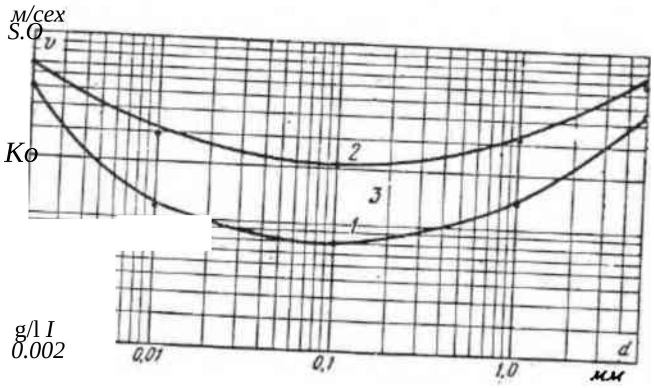


Рис. 77. Размывающие скорости для различных фракций грунта.

Л 2 —предельные линии; 5— зона размывающих скоростей.

шая максимальная скорость определяет поперечное сечение необлицованных каналов. На рис. 77 показана зона размывающих скоростей для различных крупностей фракций от глины до мелкого гравия. График построен по практическим рекомендациям. При скоростях свыше 1,2 *м/сек* на необлицованных каналах устраивается мощение для защиты откосов.

Для каналов, облицованных бетоном, можно допустить значительные скорости, если только вода не несет пески, гравия и камней. На бетонном быстротоке ирригационной системы в Рио Верде в Утахе были допущены скорости до 12 *м/сек*. Допуская повышенные скорости и бетонной облицовке, необходимо учитывать, что поток может вырывать блоки облицовки (выдергивать их с места), поскольку фильтрационное давление воды под блоками часто превосходит давление движущейся по поверхности воды. Поэтому при задании больших скоростей течения бетонные блоки облицовки делаются значительной толщины, в особенности в тех случаях, когда они уложены на гравелистое или песчаное основание.

Для каналов, проведенных в засушливых районах, особое значение приобретает утечка воды из каналов, тогда как для энергетических каналов этими утечками можно пренебречь. Канал, вытянутый под уровнем грунтовых воды, не будет иметь утечек. В сухом климате грунтовая вода является часто добавочным источником для ирригационной воды. С этой точки зрения

утечки из энергетического канала, которые ,пополняют грунтовый поток, часто могут быть оправданы. Для каналов, проходящих в насыпях, водонепроницаемость дна и откосов обеспечивается их уплотнением или недорогой обработкой бентонитом или гашеной известью.

б) Потери на трение в каналах. Одним из критериев сравнения между облицованными и необлицованными каналами является величина потерь напора на трение. Подсчет этих потерь ведется по формуле Шези

$$v = CR^{\circ's}S^{\circ's}, \qquad (49)$$

где v — средняя скорость течения, *м/сек;*
R—гидравлический радиус, *м;*
S — уклон дна.

Коэффициент C определяется или по полной формуле Куттера или по формуле Маннинга

$$C==-Ук^{'/6}. \qquad (50)$$

Для n в пределах 0,012—0,020 результаты по обеим формулам практически одинаковы. Рекомендуемые значения коэффициента шероховатости n приведены в табл. 5.

в) Зимние затруднения. На широких и неглубоких каналах в зимний период отмечаются эксплуатационные затруднения от льда, особенно при больших скоростях течения. В этих условиях при скорости, достаточной для предупреждения замерзания, образуются в больших количествах донный лед и шуга. В суровых зимних условиях целесообразно переходить на закрытое сечение. Однако ледовые затруднения на каналах могут быть предупреждены или во всяком случае уменьшены до минимума при тщательном проектировании и эксплуатации сооружения.

Обычно узкие и. глубокие каналы менее подвержены ледовым затруднениям, чем мелкие и широкие. При назначении предельных скоростей течения с учетом ледовых условий должны быть учтены дополнительные факторы. В ночное время, когда на большинстве ГЭС нагрузка достигает минимума, скорости будут иметь наименьшее значение и может образоваться ледяной покров; возникновение шуги и донного льда в этот период, как правило, исключено. Скорость воды в канале, допускающая образование поверхностного льда, должна быть меньше. 0,75 *м/сек.* Для тех установок (мельницы, химические предприятия), на которых максимальная нагрузка приходится на ночь, желательно перед наступлением похолодания прекращать работу установок или снижать на них нагрузку, с тем чтобы обеспечить образование ледяного покрова.

Если конструкция водоприемника препятствует поступлению льда в канал, то образовавшийся в канале лед может быть извлечен в процессе эксплуатации. Когда водоприемник расположен на реке, несущей большое количество раздробленного льда, как, например, р. Св. Лаврентия, Ниагара или Сусквеганна, то для предупреждения попадания льда в канал при некоторых режимах вода забирается со дна реки со сравнительно малыми скоростями. Направление водозабора выполнено под прямым углом к направлению течения потока. При этих условиях лед проносится по поверхности мимо водоприемника. Чтобы обеспечить такие условия водозабора, водоприемник целесообразно углубить в дно реки, с тем чтобы обеспечить поступление глубинных 'слоев. Для отвода льдин перед входом в трубопровод или машинное здание должен быть запроектирован напорный бассейн достаточных размеров.

Облицовка каналов. Как указывалось ранее, каналы облицовываются бетоном или другим водонепроницаемым материалом для предупреждения фильтрации и увеличения скоростей течения. Следует иметь в виду, что объем выемки для облицованного канала будет всегда меньше, чем для необлицованного. Облицованный канал дает пониженное значение коэффициента шероховатости, и это позволяет использовать величины скоростей, отвечающие экономическому значению потерь напора, а не предельным значениям по размыву.

Для облицовки откосов используются бетонные плиты состава 1:2:4.

Таблица 5

Характеристика поверхности	Значения: минимальное	среднее	
Каналы, выполненные сухопутными снарядами			
Значения *n* в земляных каналах увеличиваются с увеличением срока их эксплуатации, если не'производится регулярная Расчистка. При слабой мутности воды тонкий слой наносов оседает на дне и стенках, несколько уменьшая значение *n*. Осаждение наносов также уменьшает *n*, но иснижаетплощадьживогосечения			
Наилучшие условия имеют место в плотных илистых или глинистых грунтах со скоростями течения ниже размывающих, ь этих условиях при отсутствии на стенках канала растительност и			
Новые каналы в суглинистых или глинистых грунтах	0,016	0,016 0,020	0,0225
Средние и большие каналы в плотных грунтах с надлежащим эксплуатационным уходом		0,0225	
Малые каналы с шероховатыми стенками и плохо эксплуатируемые большие каналы		0,025	
дномЭНеРГеТИЧеСКИе каналы в Г0рНо,х условиях с гравелистым		0,028	
Каналы, выполненные землечерпательными снарядами			
Эти каналы имеют более шероховатую поверхность чем вырытые ручным способом или бульдозерами. Использование одночерпаковых землечерпалок дает более грубую поверхность дна, чем при драглайне. Различие в значениях *n* всецело зависит от удобообрабатываемости грунтов и наличия илистых наносов в воде, сглаживающих начальную шероховатость	0,0225	0,030	0,040
Каналы в скале			
Для расчета принимается проектное сечение без учета пере ора. При проходе канала в скале с горизонтальной слоистостью может быть получено очень гладкое дно. Такие каналы при значительной ширине будут обладать низким значением *n*, поскольку шероховатые стенки оказывают малое влияние, поэтому не г смысла приводить их в порядок путем сглаживания выступов. Отложения песка и гравия в каналах в скале уменьшают коэффициент шероховатости за счет заполнения неровностей дна	0,023	0,033	0,040
Естественные русла			
Дать точное описание условий естественного русла которые соответствовали бы некоторой заданной величине *n* не представляется возможным; можно рекомендовать принимать *n* равным ?ао прини	0,025	0,030	0,10
Каналы с бетонной облицовкой			
Значение *n* зависит от характеристик бетонной поверхности и качества работы. Могут наблюдаться значительные колебания в зависимости от качества работ и квалификации рабочих. Следует иметь в виду, что при строительстве могут проектированы^ ЛУ,ШИе УСЛоВИЯ, ЧвМ КоТорЫе были за,			
Наилучшие практически достижимые качества облицовки Щ тельная затирка, строительные и температурные швы абсолютно гладки	0,011	0,012	0,013
Необработанная поверхность при тщательном стыковании опалубки, грубая затирка, тщательная заделка швов	0,013	0,014	0,015
ьетон со значительными выступами от опалубки или при отложении гравия на облицовках предыдущих типов '	0,015	0,016	0,018
J ри наличии растительности на стенках значения *n* должны оыть увеличены на		0,002	
Значение *n*, превосходящее 0,017, характеризует плохой бетон, который или некачественно выполнен, или подвержен действию мороза или агрессивных вод. Такие же значения могут -иметь каналы, на которых бетонная поверхность теряет свои качества за счет отложения песка и гравия, наличия мха или			

Продолжение табл. &

Характеристика поверхности	Значения		
	минимальное	среднее	максимальное
водорослей. Как мох, так и водоросли могут нарастать на стенках при скоростях 10—12 *м,)сек.* Для уменьшения растительности целесообразно перекрывать канал, чтобы не допускать солнечного света			
Торкретные облицовки			
Бетонные облицовки, выполненные цемент-пушкой, расположенной в канале, с затиркой и заглаживанием щеткой	0,014	0,016	0,019
Заглаживание поверхности торкрета улучшает ее качество с точки зрения шероховатости, но может увеличить потери на фильтрацию за счет нарушения плотности слоя торкрета. Рекомендуется обработать поверхность проволочными щетками, до того как она затвердеет			
Облицовки из различных типов кладки			
Кладка из обожженного кирпича	0,011	0,013	0,015
Кирпичная кладка на цементном растворе	0,012	0,015	0,017
Кладка из тесаного камня	0,013	0,015	0,017
Для каналов со смешанной облицовкой, состоящей из естественной скалы с нагорной стороны, гладкой бетонной стенки с низовой стороны и дном, выложенным бетоном, тщательно уложенным	—	0,020	
То же, но при дне, покрытом песком или гравием, сохранившемся после выемки без выступов; нагорный откос выполнен тщательно	—	0,025	—
Каменная кладка на цементном растворе	0,017	0,025	0,030
Сухая булыжная кладка	0,026	0,033	0,035
Деревянные лотки			
Данные относятся к тщательно выполненным лоткам при хорошей эксплуатации и отсутствии выступов; при наличии скрепляющих реек они учитываются в смоченном периметре			
Строганые доски, уложенные продольно по стенкам и дну	0,011	0,014	0,018
Нестроганые доски с продольными стыками	0,012	0,015	0,018
При покрытии поверхности лотка кровельными материалами	от 0,01 до 0,017		
Лотки из деревянных клеток			
Креозотированные	0,011	0,012	0,014
Необработанные	0,010	0,012	0,014
Стальные лотки с гладкой внутренней поверхностью			
Неокрашенные	0,0105	0,012	0,014
Окрашенные	0,012	0,013	0,017
Условия шероховатости для этих типов лотков меняются в довольно значительных пределах в зависимости от их размеров, конструкции, способа производства работ и условий эксплуатации			

Наиболее распространенным методом является устройство панелей толщиной 10—15 *см* и длиной 3—6 *м*, которые укладываются по подготовленным откосам в выемке. Преимуществом разделения облицовки на панели является возможность свободной осадки отдельных плит. Таким образом, плиты перемещаются индивидуально и этим самым исключается опасность трещинообразования, которая возникла бы при монолитной Облицовке. Это разделение на панели также имеет значение для восприятия температурных деформаций. Панели укладываются в шахматном порядке, с тем чтобы избежать длинных поперечных швов. Эффективным приемом устройства водонепроницаемых швов между плитами является метод, показанный на рис. 78. В типе а деревянные прокладки образуют качественный и дешевый

шов расширения. Они кладутся на место в сухом состоянии перед заливкой бетона, затем они набухают, и шов становится очень плотным. При сжатии плит стык между бетоном и деревом обеспечивает водонепроницаемость. Недостатком деревянных прокладок является их гниение при переменном смачивании. Однако в энергетических каналах, где деревянные прокладки, как правило, будут смочены все время, они могут быть весьма долговечными. Тип *б* выполнен в виде бетонной подушки толщиной 10—15 *см*, подложенной под стык. Поверхности стыка смазываются -битуминозным материалом. При сжатии или расширении плит они скользят по подушке и сохраняют плотность шва. В этом типе опорные подушки балочки могут укладываться до устройства плит. В типе *в* шпунтовые соединения обеспечивают перемещение плит и в то же время сохраняют неизменность их положения. Битуминозная прослойка, показанная на чертеже, обеспечивает водонепроницаемость. Тип *г* (рис. 78) аналогичен типу *б*, за исключением того, что опора является элементом одной из плит; этот тип используется для железобетонных покрытий. Соединение по типу *д* требует прокладки медного листа, заделанного в концы обеих плит; пустота заполняется битуминозным материалом и покрывается цементным раствором для создания гладкой поверхности. Эта заделка не совсем удачна. В местах, где бетонная облицовка постоянно смочена и находится в тени, рекомендуется устройство упругих резиновых прокладок, которые по некоторым сведениям довольно устойчивы.

Армированные облицовки выполняются из более тонких плит. Они устраиваются обычно монолитными без швов расширения, или во всяком случае эти швы устраиваются на большом расстоянии. Есть мнение, что облицовка такого типа прочнее облицовки из отдельных плит. По-видимому, арматура вызывает большое число мельчайших трещин вместо нескольких крупных трещин, как это имело место при неармированной облицовке. Толщина бетона меняется от 4 до 8 *см.*

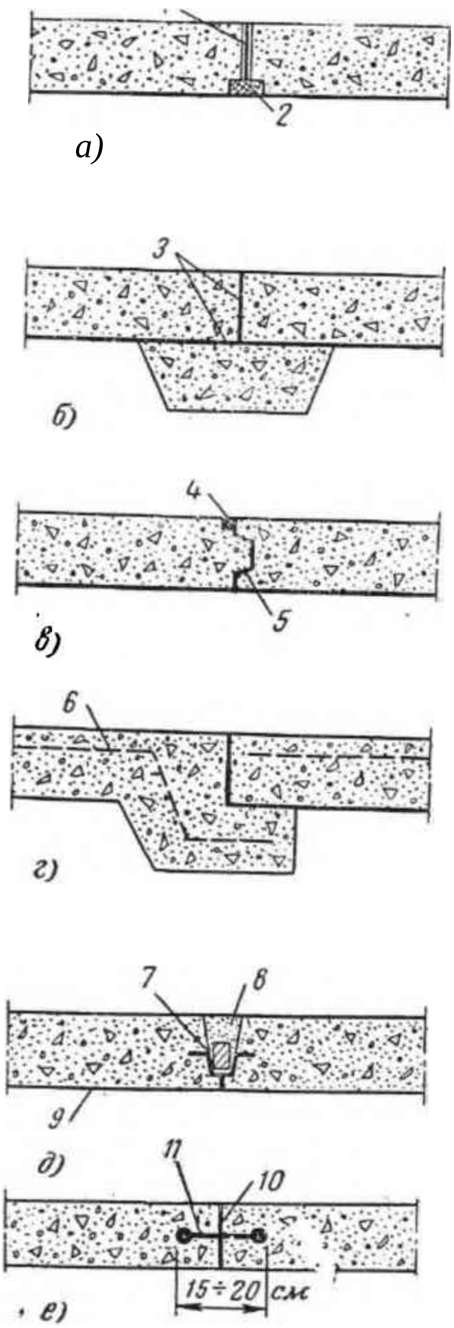


Рис. 78. Конструкции швов бетонных облицовок.

9 битумная прокладка; 2 — сухая сосновая доска; д битумное покрытие; *4* — битумная шпонка; *5* — битумная обмазка; *6*—арматура; 7 — битумная прокладка; *8* — раствор; *9* — битумное покрытие*; *10* — битумное уплотнение, *11* — резиновая прокладка.

Арматура состоит из проволочной сетки по подготовленным откосам на поддерживающей подставке из небольших кусков бетона или дерева. Затем укладывается бетон, причем должна быть соблюдена тщательность в расположении арматуры, с тем чтобы не допустить прикасания ее к грунту. Для этой цели необходимо при укладке бетона слегка приподнимать арматурную сетку и встряхивать ее.

При уклоне откоса 1:1 или положе бетонирование целесообразно вести без форм, используя жесткий бетон. Поверхность 'бетона заглаживается и зачищается. Таким способом может быть получена очень гладкая поверхность, имеющая малую величину коэффициента шероховатости. Для откосов круче 1:1 используется опалубка и применяется более пластичный бетон. Процент арматуры для таких облицовок составляет примерно 0,3. Состав бетона обычно 1:2:4 для толстых облицовок с крупностью гравия, не превышающей 4 *см*. Состав растворов меняется от 1:2,5 до 1.-5. Реальным преимуществом тонких железобетонных покрытий является их меньшая стоимость в сравнении с бетонными плитами.

Существенное значение для устройства облицовки имеет торкрет, который укладывается толщиной 1,5—5 *см*. После обработки откосов и уборки всего лишнего грунта с них на откосы укладывается тонкая сетка, поддерживаемая небольшими плитками из раствора, к которым она привязывается. Затем производится нанесение торкрета. Когда торкретный слой достигает необходимой толщины, весь свободный материал удаляется и поверхность затирается щетками. Этот метод дает очень прочную и водонепроницаемую поверхность.

При устройстве облицовки в том случае, если грунтовые воды находятся несколько выше дна канала, необходимо устраивать тщательный дренаж. При отсутствии дренажа облицовка может 'быть сдвинута давлением воды с нижней стороны облицовки при опорожнении канала. В холодном климате облицовка может быть сдвинута при замерзании при опорожненном канале. Эффективный дренаж может оыть получен или наброской камня, или устройством открытых дрен, выходящих из-под канала.

18. ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ СООРУЖЕНИЯ НА КАНАЛАХ

Деривационные каналы должны снабжаться группой вспомогательных сооружений. Для предупреждения перелива воды через бровку канала, который может возникнуть при дополнительном питании канала или движении волн, в некоторых местах канала устраиваются боковые водосливы. Они обычно устраиваются вблизи станционного узла или непосредственно в напорном бассейне, а при длинных каналах — и по их длине.

При водозаборе из неглубоких бьефов в деривационные каналы поступает значительное количество наносов. Если же скорости в канале значительны ,и наносы транспортируются во взвешенном состоянии, то, поступая на турбину, они вызывают истирание рабочих органов. Если перед плотиной имеет место неглубокий бьеф или перед зданием ГЭС находится напорный бассейн, то часть наносов осаждается в этом объеме, откуда она с помощью специальных мер подлежит удалению. На ряде установок требуется устройство отстойных бассейнов.

При проектировании отстойников частицы наносов не больше 0,05 *мм* могут быть пропущены через турбины и не вызывают истирания. Длина отстойника зависит от скорости осаждения частиц наносов. По ряду опытных данных для Всеамериканского канала длина отстойного бассейна может быть принята равной 21,5 глубины бассейна над слоем осевших наносов, Скорость в отстойном бассейне принималась равной 0,07 *м^сек-*, для ее создания треуется устройство мелкого и широкого бассейна или узкого и глубокого. Должно быть предусмотрено достаточное пространство под глубиной нетто отстойника для приема осевших наносов. Это пространство зависит от ожидаемого количества наносов, времени между промывками и метода поо мыва.

Особое внимание при проектировании камер отстойника должно быть уделено распределению скоростей по ■сечению камеры. 'Скорости должны быть распределены равномерно по всей площади камеры. Равномерное распределение скоростей может быть осуществлено с помощью забральной стенки или затопленного водослива, как это часто делается на водопроводных установках. Однако такая схема вызывает иногда довольно суще-

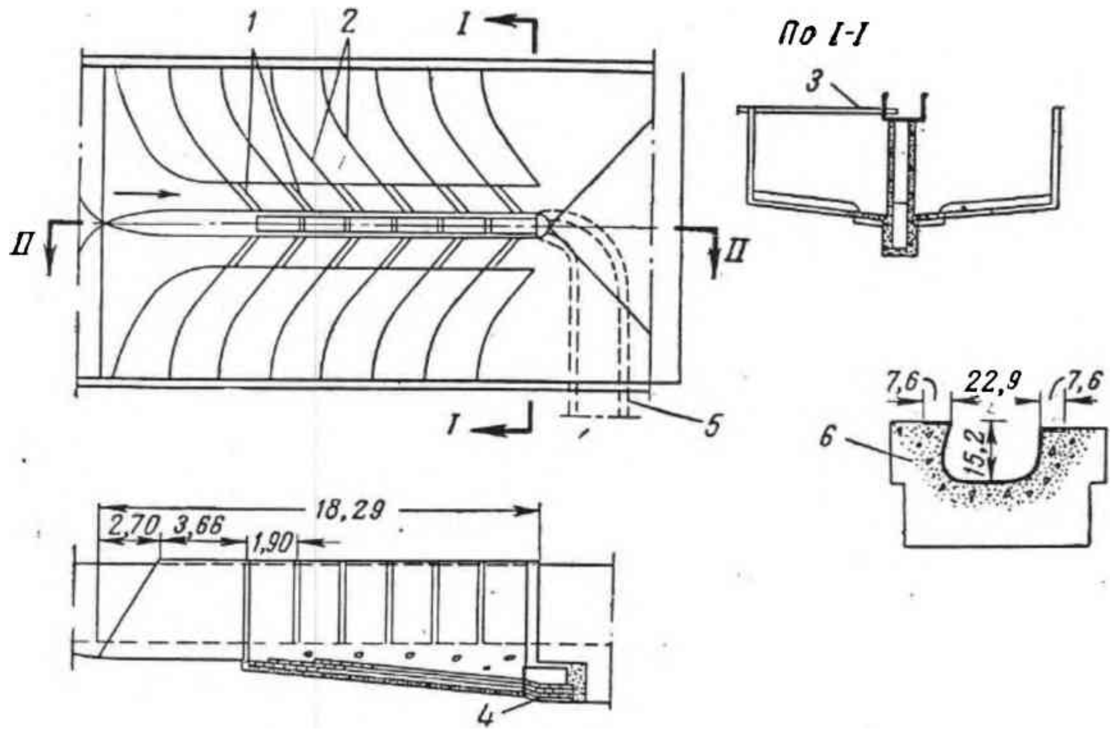


Рис. 79. Песколовка с вихревым струеотклонителем.
/ - вихреобразователи; 2 - отклонители; *3* - мостик; *4* - деревянные облицовочные блоки- *5* — промывной канал; *6* — сечение вихреобразователи.

ственную потерю напора, которым нельзя пренебрегать при проектировании. На рис. 79 показана схема песколовки для ГЭС Форт Коллинз. Этот тип песколовки с отклонителями и водоворотами служит для удаления наносов различных крупностей.

Струеотклонители, показ энные на рис. 79, 'отклоняют наносы к промывным трубам. Промывные трубы улавливают наносы и сбрасывают их в среднюю камеру, где они удаляются по прямолинейной траншее. Этот тип песколовки показал хорошие практические результаты как для малых, так и для больших каналов с расходом до 30 *м*^{3}*/сек* для разных крупностей наносов от мелкого песка до мелкого гравия. Эффективность промыва песколовки составляет 90%. Для каналов шириной от 2,5 до 5 *м* отклонители должны быть расположены на одной стороне песколовки, а трубы и выпуски— на противоположной.

Расходы по удалению наносов из Всеамериканского канала достигали 1 млн. долл, в год. Для уменьшения этих расходов была запроектирована и сооружена система отстойных сооружений, состоящая из нескольких бассейнов, сгруппированных по два бассейна, с самостоятельным питанием каждой пары от головного узла. Каждый бассейн имеет длину примерно 240 *м* и ширину 80 *м* при средней глубине около 4 лги установлен под углом 60 к главному каналу. Подводящие каналы для каждой пары бассейнов имеют уменьшающееся поперечное сечение с вертикальными стенками, чтобы создать равномерное распределение скоростей. В каждый бассейн вода переливается через водослив, где она собирается в отводящую галерею, и оттуда поступает в канал. Очистные сооружения плотины Импириел были рассчитаны на 340 *м*^{3}*/сек.* Л4аксимальная скорость в отстойном бассейне 0,07 *м/сек*, а период осаждения наносов 21 *мин* вполне достаточен для удаления всех наносов крупнее 0,05 *мм.* Дорровские вращающиеся скреперы диаметром 37,5 *м* сбрасывают осевшие наносы через сборные галереи. Каждый бассейн имеет свою промыцную галерею или туннель, по которому наносы поступают в главный коллектор, который сбрасывает наносы в реку ниже плотины.

19. ДЕРЕВЯННЫЕ И БЕТОННЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ

Деревянные трубопроводы ГЭС применяются для напоров до 120—150 *м* диаметром от 1 до 6 *м*.

Деревянные трубопроводы собираются на опорных седлах. После того как произведена укладка нижней части трубы, выкладывается верхняя часть по портативным деревянным формам, устанавливаемым внутри трубы, которые вместе с подвижными опорами переносятся вдоль трубопровода. При обычном методе монтажа клепки приблизительно одинаковой длины укладываются в обе части трубопровода в шахматном порядке так, чтобы каждая последующая клепка выступала не меньше чем на 60 *см* над предыдущей. В некоторых случаях трубопровод собирается из клепок разных длин. При этом единственным условием является соблюдение шага клепок.

Трубопровод стягивается металлическими бандажами. Диаметр и шаг бандажей определяются величиной напора. Обычно диаметр бандажей берется от 12 до 35 *мм* при минимальном расстоянии между ними, примерно равном двум диаметрам бандажа. Деревянный трубопровод достаточно устойчив в опорожненном состоянии. Вследствие гибкости клепок представляется возможным изгибать деревянный трубопровод в любом направлении при сравнительно малых радиусах закругления.

Уплотнение трубопровода достигается устройством шпунтовых соединений клепок. Деревянные трубопроводы желательно монтировать из воздушно-сухой клепки. Клепки из влажной древесины усложняют монтаж, так как требуют переменно1го натяжения бандажей при сборке. После того как монтаж трубы завершен, производится постепенное наполнение ее, причем очень медленное, так как, несмотря на все предосторожности, будут иметь место неплотности в стыках и необходимо, чтобы утечка из этих стыков происходила медленно под малым напором/ Другой причиной медленного наполнения является стремление уменьшить полное напряжение в бандажах в течение того времени, когда клепки насыщаются и происходит разбухание дерева с постепенным уменьшением напряжения. Разбухание клепок вызывает дополнительные усилия в бандажах, эквивалентные увеличению внутреннего давления до 5—7 *кг!см*^{2}. Этот процесс практически прекращает все утечки в течение нескольких часов. Незакрывающиеся, фильтрующие стыки должны быть дополнительно обработаны. Там, где обнаруживается течь, в образовавшуюся щель вбивается клин из плотного дерева. Этим способом можно практически устранить все утечки.

Размеры клепок определяются эмпирическими isaB'HOHMocTHMH. Клепки должны выдерживать давление воды без прогиба и обладать достаточной прочностью.

Толщина клепки должна обеспечивать полную пропитку водой древесины при действующем напоре. Минимальная толщина назначается не менее 35—40 *мм*, максимальная толщина не превосходит 100 *мм*. Ширина клепки не превышает обычно 200 *мм*.

Продолжительность эксплуатации деревянных труб являлась предметом дискуссии. В общих чертах она зависит от характера установки, глубины засыпки и свойств грунта, с которым соприкасается труба. Большое значение имеют также качество надзора, эксплуатационные условия (постоянное или переменное наполнение трубопровода водой) и качество лесоматериала.

Срок жизни деревянного трубопровода при благоприятных условиях при соответствующем уходе составляет 20—30 лет. В отдельных случаях этот срок может превышать 30 лет; трубы, обработанные креозотом, имеют больший срок службы. При тщательной эксплуатации срок службы трубопровода находится в пределах 30—50 лет.

Если трубопровод должен использоваться как временный, то характер его сборки и монтажа не имеет особого значения. Для постоянных трубопроводов монтаж должен проводиться по тщательно выполненным опорам. Засыпку трубопровода делать не рекомендуется из-за возможности быстрого гниения клепки.

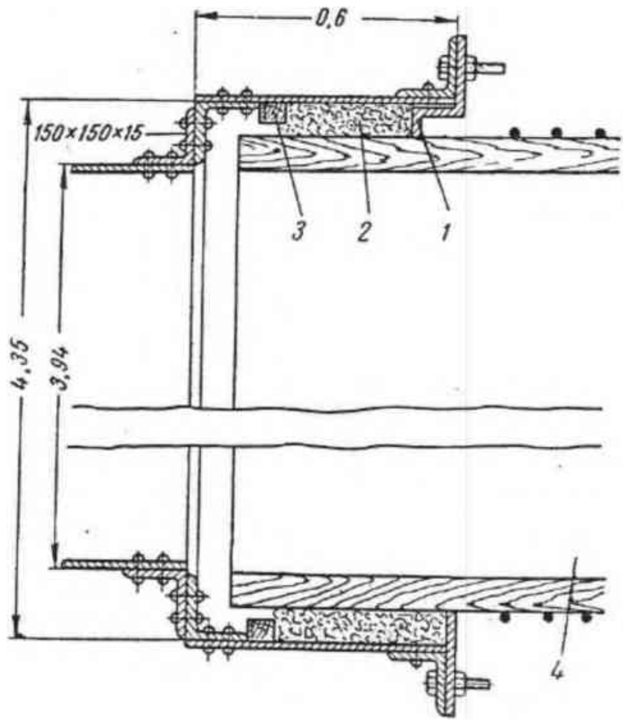


Рис. 80. Сопряжение деревянного трубопровода с металлическим.

1 — уплотняющее кольцо; *2* — уплотнение; *3* — ограничитель; *4* — деревянная труба.

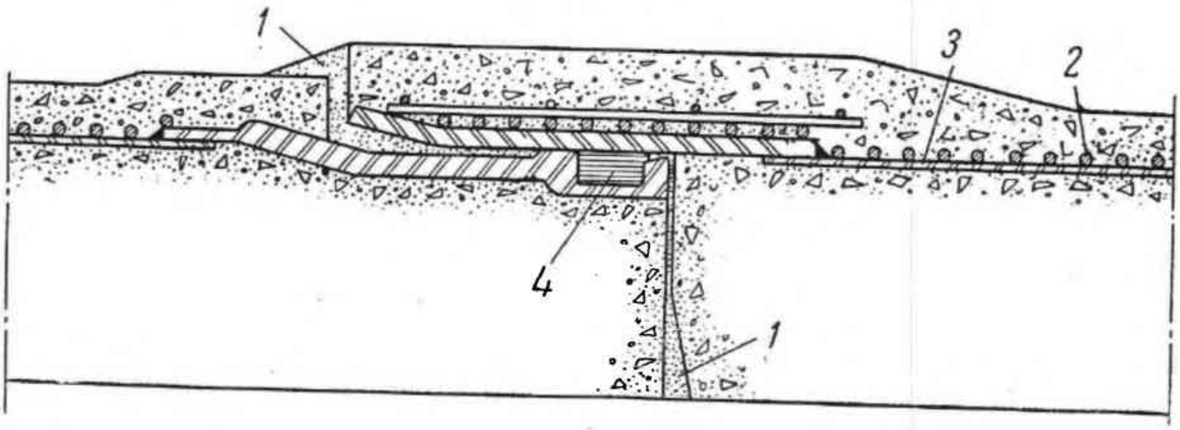


Рис. 81. Стык для железобетонных трубопроводов.

1 — раствор; *2* — стальной цилиндр; *3* — поперечная арматура; *4* — резиновое уплотнение.

Все трубопроводы должны подвергаться наружной окраске. Продолжительность службы клепки определяется ее способностью сопротивляться загниванию.

Деревянные трубопроводы подвержены обмерзанию вследствие утечек. Обмерзание может быть очень значительным. Выпадающий снег может нагромождаться на трубопровод и создавать дополнительную нагрузку. По имеющимся данным обмерзание деревянных трубопроводов внутри очень невелико.

Компенсаторы на деревянных трубопроводах не устанавливаются. Для сопряжения деревянного трубопровода с металлическим может быть использован стык, показанный на рис. 80.

пп лпКаг?пСТВе ^доводов с напорами *м* применяются также бетонные и железобетонные трубопроводы Последнее время используются трубопроводы из предварительно напряженного бетона. Стыки и температурные швы железобетонных трубопроводов очень сложны. Возможный тип стыка для трубопровода диаметром 1,7 *м* показан на рис. 81. При монтаже этого стыка все каверны, остающиеся на внутренней части трубы, покрываются цементным раствором.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ТУРБИННЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ[1]

20. ТИПЫ И КОНСТРУКЦИИ СТАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В качестве турбинных трубопроводов в подавляющем числе случаев используются стальные трубы. Стальные трубопроводы прокладываются от напорного бассейна или уравнительного резервуара до машинного здания ГЭС.

В .гидроэнергетическом строитель-[1]стве используются два вида стальных трубопроводов, различающихся по способу изготовления: клепаные и сварные. После 1947 г. подавляющее большинство трубопроводов выполняются сварными. Сварные трубопроводы имеют большие монтажные преимущества перед клепаными и имеют хорошее качество внутренней поверхности.

Нагрузки на трубопровод включают в себя внутреннее давление воды с учетом гидравлического удара, веса воды в трубопроводе и веса самой трубы. Максимальное внутреннее давление, на которое рассчитываются трубопроводы, представляет собой максимальное статическое давление с учетом максимального давления от гидравлического удара и наивысшего подъема уровня воды в уравнительном резервуаре. Толщина тонких цилиндрических оболочек рассчитывается на внутреннее давление по котельной формуле.

Обычная практика выбора пониженных напряжений для обеспечения запаса на неточность определения нагрузок не может быть использована для трубопроводов ГЭС, поскольку подъём уровня в резервуаре или увеличение нагрузки над статической непостоянны по длине трубопровода. На рис. 82 линия *АС* представляет собой расчетное повышение давления от гидір ав *л* и ч ес ко го уд ар а.

Отношение полного напора к статическому, как показано на графике *б* на рис. 82, достигает 200% в точке *D* и 150% в точке Е. При ошибке в определении удара до 50% нагрузка изменяется до 25%’ для точки *D* и только 16,7% для точки *Е*.

В расчетную величину давления в трубопроводе следует вводить некоторый запас с тем, чтобы напряжения в стенках трубопровода при гидравлическом ударе не превосходили предела упругости.

По всей длине трубопровода дается увеличение толщины стенок на 3 *мм* для учета коррозии.

Диаметр трубопроводов может меняться в довольно широких пределах, но существует только один диаметр для данных условий, который является наиболее экономичным. 'Скорость в трубопроводе может меняться от 2 до 6 *м/сек*. Обычная скорость для средненапорных ГЭС равна ~3,5 *м/сек* для максимального расхода. Значительное влияние на выбор экономичного диаметра имеет график суточной нагруз-

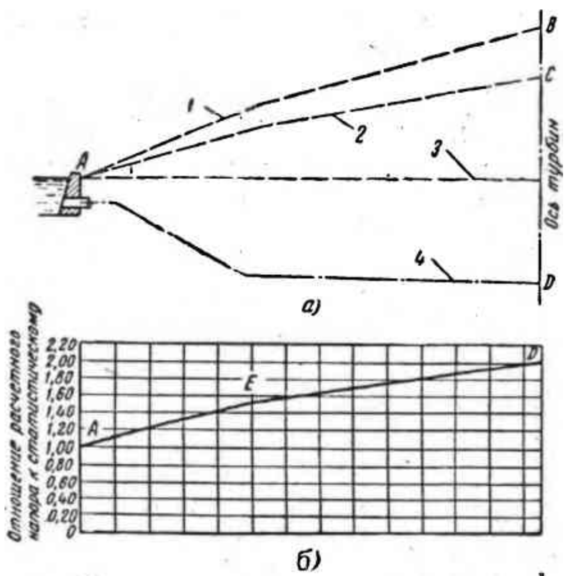


Рис. 82. Метод расчета изменения давления в трубопроводе.

1 — возможный подъем давления; *2* — расчетный подъем давления; *3* — статический уровень; *4* — профиль, по трубопроводу.

[1] В этой главе объединены материалы Справочника, относящиеся к расчетам и конструированию стальных трубопроводов, (расчетам^ гидравлического удара .и колебанию уровня воды в уравнительных резервуарах. В -Справочнике эти .материалы изложены менее 'подробно, чем в отечественных справочных изданиях. Однако некоторые простейшие расчеты, включенные в перевод, могут представить интерес для предварительных стадий проектирования.

ки. Так, .например, если пик нагрузки имеет малую продолжительность, то экономически оправдано допускать на этот период повышенную скорость. Для определения экономичного сечения трубопроводов делают несколько пробных попыток, принимая во внимание различные диаметры трубопровода, разные .потери 'энергии и т. п.

Коэффициент шва для сварной стальной трубы колеблется от 0,90 до 0,95 при условии, что трубопровод сделан на заводе. Обычно в практике проектирования трубопроводов для расчета принимается коэффициент 0,8 при двойной сварке. Коэффициент в 0,75 рекомендуется для двусторонне сваренных швов внахлестку при толщине стенок не свыше 10 *мм.*

Стыкование элементов трубопровода должно идти с помощью газовой сварки или электрической дуги для расплавливания электрода и материала трубопровода. Метод сварки меняется в широких пределах; имеются примеры автоматической сварки, большинство труб сваривается электросваркой.

Как правило, продольные швы желательно выполнять на заводе, но это возможно до некоторого предела размеров труб по условиям сварки и транспортировки. Отсюда, однако, не следует, что все трубопроводы большого диаметра должны изготавливаться на строительстве. 'Своеобразное решение было принято при монтаже трубопровода гидростанции Гувер диаметром 9,15 *м.* В этом случае, учитывая большой объем монтажа, листы толщиной до 7 *см* доставлялись на место, где был выстроен специальный завод, оборудованный для гнутья, сварки, термической обработки и рентгеноскопии. Это редкий случай сочетания полевой и заводской работы.

При проектировании сварных трубопроводов должен быть сделан выбор между сваркой впритык и внахлестку. Если принимается нахлестка, то полная сварка должна быть сделана снаружи и внутри трубопровода. Если же сварка делается впритык, то должен быть выполнен двойной шов или же единичный шов с подваркой снизу.

Теория расчета оболочек, которая в настоящее время преимущественно применяется для расчета трубопроводов, является до некоторой степени новым методом. Применение этого способа дает возможность выполнить сооружение с меньшей толщиной листов и большим расстоянием между опорами.

Вес сварных труб со стыками впритык и без накладок может быть получен по следующей эмпирической формуле:

$$W = \frac{l,47ZtcZ^{2}}{\text{--------}},$$

Ш *W*— вес трубы, *ml пог. м*
h — давление в центре трубопровода от всех нагрузок, *м*
d — внутренний диаметр трубы, *м*
s—коэффициент шва (0,80 для двойного сварного шва впритык и 0,75 для швов внахлестку для толщин до 10 *мм*,
p — допускаемое напряжение, *кг/см,*^{2}.

Стальные трубопроводы монтируются по опорам седлообразного типа, как показано на рис. 83, или кольцевым опорам, поддерживаемым невысокими колоннами. Вес трубопровода в обоих случаях передается на бетонные опоры. Последние должны рассчитываться с учетом качества основания, В местах перелома профиля на всех углах поворота трубопровода и между двумя компенсаторами при длинном трубопроводе должны устраиваться анкерные опоры. Для засыпанных труб

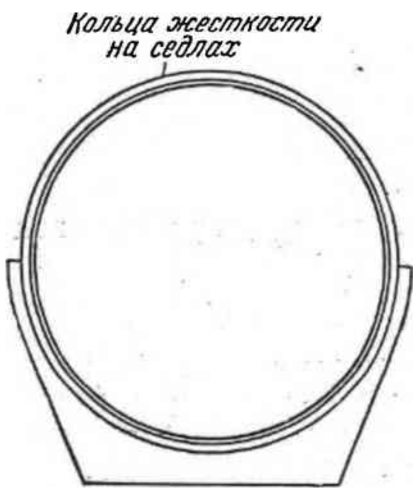
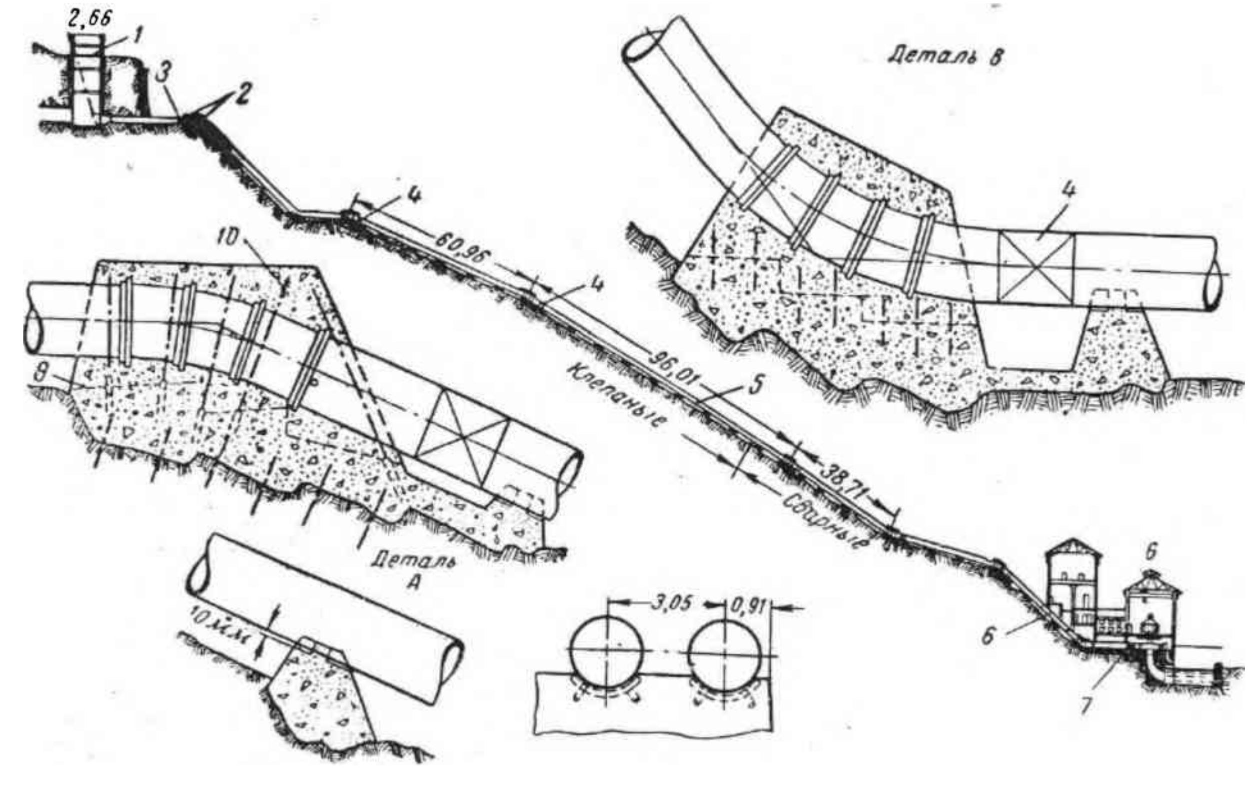


Рис. 83. Седлообразная опора.



-уравнительная резервуап- 2 _ ДеТЭЛИ тРУбопроводов.
шинная зал,- 7 _ затвор;Т"1о 6 ~ ма'

ютсяР дХОПоРЬ1 обыЧ!П0 не ирименя-
ея ия Анк0рные опоры рассчитывают-
АикРпн!Се деистаУюЩ'ие на них силы.
япмпР ОПОра должна своим весом
ни.пп сировать возможный недоучет
Пиедад6тм51 Равноденйст1вующей. На
опоры4 ДЭЯа КМСТ'РУКЦИЯ анкерной

а схеме Рис- 85 показаны дей-
ствующие на опору силы. Эти силы
конр1!,УЮЩИе На 0П0|РУ трубопровода, в
ной .иотмИТ0Ге сводядся к вертикаль-
котошыр 'Ризонтальной компонентам,
которые вместе с весом опоры дают
лежатьTZоW'о' КотмР?Я должна пределах средней трети по-
дошвы основания анкерной опоры
ны быт,Дпптмь[X тРУбопроводов долж-
““ б ? риняты меРы, обеспечиваю-
укопо^иП,рвПЯТСГвенное Учинение и
Упрочение трубопровода под влия-
нием температуры. Если трубопровод
РДоноложеи на горизонтальной местно-
межтм ЛГПеНСЭТОры Располагаются
ду анкерными опорами, с тем что-
тр^бппТ'н К м'инимУму перемещение
тупы ^“вода "«Л влиянием' темпера-
Ур • Однако при устройстве анкерных
опор на крутых склонах делесообрСо

располагатв температурный шов у
' р него анкера, передавая исе давле-
ние от сил трения на нижнюю анкер*
ную опору. Такая схема упрощает воз-
ведение трубопровода, поскольку весь-
трудно вести его монтаж между
компенсаторам и анкерной опорой *из-за* сползания трубопровода вниз по
^«межуточным опора!м. Если расстоя
стопьЛеЖДУ анкеРНЬ1М« опорами на-
олько велико, что перемещение тру-
При 'ма№и'мальиой темпе-
отииь, ,больше' чем воспринимаемое
одним компенсатором, то может по-
тРоерaОвВаТЬСЯ ^стройотво даУх компенса-



Рис. 85. Схема сил, действующих на анкер
/ ную опору. г

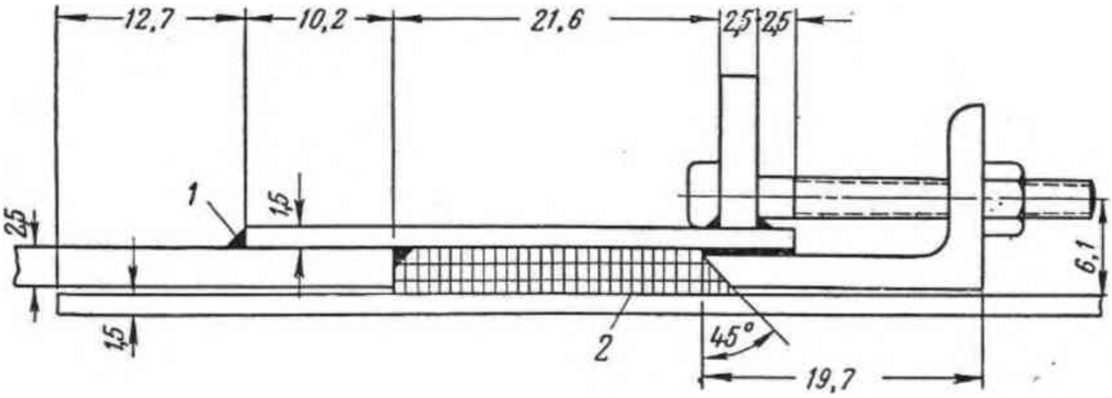


Рис. 86. Сальниковый компенсатор для сварных трубопроводов.
1 — шов; *2* — уплотнение.

Для трубопроводов, засыпанных грунтом, устройство швов (расширения не является 'необходимым. Однако если трубопровод заделан по концам и не имеет возможности перемещаться, то устройство температурного шва является необходимым для 'снижения температурных напряжений в трубе.

Существуют два типа температурных компенсаторов: сальниковые и диафрагмовые. На рис. 86 показан характерный тип компенсатора для сварных трубопроводов. На рис. 87 показан сальниковый компенсатор для клепаного трубопровода. Уплотнение сальника удачно выполняется хлопчатобумажными пакетами, уплотненными и смазанными графитом. Соединения такого типа очень просты и дают минимальную утечку. Однако они требуют регулярного надзора с периодической сменой уплотнения. Для малых напоров и небольших перемещений успешно может быть использован диафрагмовый — тарельчатый — компенсатор, в котором перемещение трубы вызывает упругие деформации диафрагмы. В холодном климате компенсаторы должны быть установлены в тепляках. Температурные сжатия и расширения трубопровода являются наибольшими при пустом трубопроводе, причем вероятно, что это будет иметь место при большом диапазоне температур в период строительства; в проекте должны быть предусмотрены ^специальные мероприятия, учитывающие ’это> положение. На акведуке Кетскил были сделаны пробные определения фактических деформаций трубопроводов. Экспериментальные данные хорошо соответствуют расчетным.

Окраска трубопроводов для предупреждения коррозии производится различными составами, но ни один из них не является удачным. Время работы трубопровода на поверхности земли ничем не ограничено, если обеспечена частая окраска его. Экономически оправдано вести окраску наиболее дорогими сортами красок.

На качество окраски должно быть обращено самое серьезное внимание. Плохо нанесенная на поверхность высококачественная краска не лучше, чем краска плохого качества. Качество окраски различно для внутренней и наружной поверхностей трубопровода.

Для засыпанных трубопроводов должно быть обращено внимание на то, чтобы при засыпке на трубопровод не попадали кислоты от гниющей растительности или другие ингредиенты, которые могут повлиять на устойчивость краски. Грунт должен быть тщательно обследован специальным инженером с производством химических анализов в присутствии представителя поставщика краски.

Перед нанесением на трубопровод первого покрова сурика или иной основы поверхность трубопровода должна



Рис. 87. Сальниковый компенсатор для клепаного трубопровода (размеры — в метрах)

быть очищена пескоструйным аппаратом от ржавчины и наростов. Это одна из наиболее ответственных процедур обеспечивающих качественность окраски. Использование сурика для первого слоя краски дает хорошие результаты, но он поддается истиранию, поэтому вторым и третьим слоями должны быть Какие-нибудь устойчивые краски. Хорошие результаты получены с алюминиевой краской как для наружной, так и для внутренней покраски.

Широко используется битумная обмазка, но материал этот несколько дорог, поэтому его уместно употреблять для наружной окраски. Битумные обмазки на щитах Панамского канала сохранились в течение 30 лет.

„В холодных местностях на внутренней поверхности трубопровода образуется слой льда. Толщина слоя может быть настолько значительной, что она ,удет влиять на гидравлические характеристики трубопровода. При оттаивании лед ломается и проходит на турбины, что может вызвать поломку ее рабочих органов. В условиях обмерзшего трубопровода величина гидравлического удара может оказаться больше расчетной.

Появление ледовых затруднений обусловливается следующими факторами. уменьшенной скоростью течения воды в периоды малых нагрузок, продолжительностью этих периодов, климатом местности, подверженности трубопровода доминирующим ветрам, заглублением входа в трубопровод'под поверхностью воды. Поэтому вероятность возникновения ледовых затруднений должна быть определена из опыта и путем сравнения с существующими ~~----------- - сооружениями. Так, например, будут иметь место затруднения на трубопроводах длиной свыше 3'0 *м* для средних климатических условий при ио^мпт ТТТТдг небольших скоростях течения и малых нагрузках. Защита трубопроводов от обмерзания может быть осуществлена засыпкой их грунтом, покрытием изоляционными материалами или помещением трубопровода в тепляк. Для засыпанной трубы при толщине слоя засыпки 1 *м* опасность обмерзания практически исключена.

Сравнение засыпанных и незасы-7ит^Ь1^ 'трУбопРоводов ДОЛЖНО ИСХО- услови” ЗК0Н0МИ“х соображений, меХостиКН Л'УаТа,Ц'И'И 'И ковФигурации ГЧГ inn х я На 'ИР^ПНЫХ деривационных си- при большом диаметре трубопровода осуществление засыпки затруд-

21. НАГРУЗКА НА ТРУБОПРОВОД ОТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА

1. Упрощенный метод расчета гидравлического удара. Американское общество инженеров-механиков дает следующую 'Классификацию расчетных случаев* для гидравлического удара в **турой** иных трубопроводах: ? ,

1. Грубопроводы постоянных ТОЛЩИНЫ и диаметра (простые).

2. Трубопроводы переменных толщины и диаметра (сложные).

(cocTaiBHbie^11^*380^51 С ответ|влениями

В этом параграфе рассматривают-ся расчеты гидравлического удара для простых трубопроводов. Сложные тру бопроводы пересчитываются на простые приближенными методами Для более точных решений в США применяются графические методы Шнейдера, Бержерона и Ангуса.

Максимальное давление обычно имеет место в конце закрытия направляющего аппарата турбины для сравнительно малой скорости закрытия, или закрытие для сложных трубопроводов происходит за время, большее, чем пять фаз гидравлического удара, и движение затвора практически равномерно, можно пользоваться графиками Аллиеви с достаточной точностью для предварительных расчетов. Однако, как правило, для окончательных расчетов должен быть использован графический метод Для применения графика Аллиеви необходимо сложный трубопровод привести к однородному. В этом случае значение *a* скорости распространения гидравлического удара определяется для каждого участка с постоянными диаметром и толщиной стенок, среднее же значение *a* получается из следующего уравнения:

$$\frac{L}{a} \qquad a_i\, a_2\, a_3 \tag{51}$$

f

вкпю^Г П0ЛНая длина трубопровода, включая уравнительный резервуар-J'/2' /з и т- Л- — соответствующие длины участков трубопроводов. Д

р начальная скорость воды

US“Р”"' V- »

L (52)

стямпи низкона1ПОРных гидроэлектро-вающейХ'тпН^ КОТС>РЫХ Длина отсасы-тпубоппп РУБЫ С0ИЗМеРима с длиной меня ° Р° ДЭ' °"а Д0Лжяа быть вклю- а в расчет .приведенной скорости, ния пт расчета максимального давле-НИЯ от гидравлического удара пои

ISтмтм “»f»тм график Аллиеви рис. 88); на рис 89

,"V'iгр,фтм ”• ”

ля £рафики Аллиеви построены исхо- следующих двух предположений:

толщ ныТада1ГаеТСя постоянство Щи ны стенок и диаметра трубопоо-ОДа, что устраняет влияние отраже-НИИ от мест перемены сечений

Номограмма Аллиеви для мини-мального давления, связанного с уве личением скорости течения при у от крытии турбин, дана на рис 90 Ука-

э^тму1еепПРИ'бЛТеНИЯ относя'тся и к У Учa1°- Номограмма построена

лТбоЖоТтм ■ГУРбИН ‘от начального ДО Движения нГнВИЯ ПРИ ЛЮбой окоР®ти направляющих лопаток.

Координаты номограмм ппелстяв иЯХя°б0Й ^“Размерные соотношения зываХТаЮТСЯ Р И Па'Раметр р на-зывается характеристикой тпубоппп-°да и выражается формулой

$$p = \frac{\wedge!L}{2g//,} \qquad (53)$$

Котiр° статический напор в нижнем от всохцртй'1 Р7°Да' отсчитываемый подммл Т 6 Фа ‘МИ от наивысшего вуаре ' В Уравнительном резер-

ги "ДраМет'р 6 показывает число фаз гидравлического удара за время за-

кpмтия (Открытия) налраяляюшего аппарата турбины:

$$9=^г=Д. \qquad (54)$$

где 7*, полное время открытия;

Н —фаза удара.

гпппеЛИЧИйа гидРа'влического удара h шени'еЛ:е яГСЯ ЧереЗ без'Ра змерное отно чальном?ат МеМаЛЬНОГ° НаПОра « на‘

$$Z\ 7ц\sim' \ h==H<№\sim\sim\wedge \qquad (55).$$

где h величина гидравлического уда-ра. J

Следует отметить *° » что для частного случая , . Д и ф ф е р е н ц и а л ь и о г о у р а в н и - тельного резервуара вычисленная ве-Дичина гидравлического удара h

уровня воды Ув, ДИЧеНа На изменение уравнения в д к в соответствии с дифференци-

вЛпепио1Р ЗерВуара' 'К0Г0,Р°е возникает тетьно н РЫТИЯ туРбины- Следова-будет е увелич«ше давления

$$^Am = {}^{/1}+A_{/!}. \qquad (56).$$

но и пГп а закрытме тУРбины равномер-лдг) времени больше пяти фаз но-ватьапп У Алл,иеви можно использо-вать для приближенных расчетов и Д-я слож-ных трубопроводов, сводя их к простому эквивалентному трубопоо воду по формуле (51). ^РУоопро

вхопитДУеТ отметмть, что величина a нат нпмпгВЫраЖеНл Ие ДЛя всех коорди-нат номограммы Аллиеви и что 0 и о изменяются в зависимости от a Пэ скольку для всех значений Й больше вышений 'Н0М0Грам мь1 для равньи по-вышении давлений (линий 2) примеп-

Г?Лтм°.ЛИНейны и "РН продолжении н'о^'чтп НУЛЬ 'К00РДинат, очевид-больше для Расчет'0'в, включающих чите ьная пИ фаЗ' будет получена зна-чительная ошибка в значении a кото-на пеТнТ0'. “е '°1Ргазитcя существенно

криваяУ п/Дтм' ^а рис' 91 показана Р ®ая' дающЩая типичную связь меж-кпытия пп°М ТУ'РбИН и временем за-па?а ппЛМ1аток направляющего аппа-(без гиппНУЛеВ°И ДЛИЯе трубопровода гмммя ДР ЧеСК0Г0 УДара). Номо-грамма Аллиеви предполагает что эта

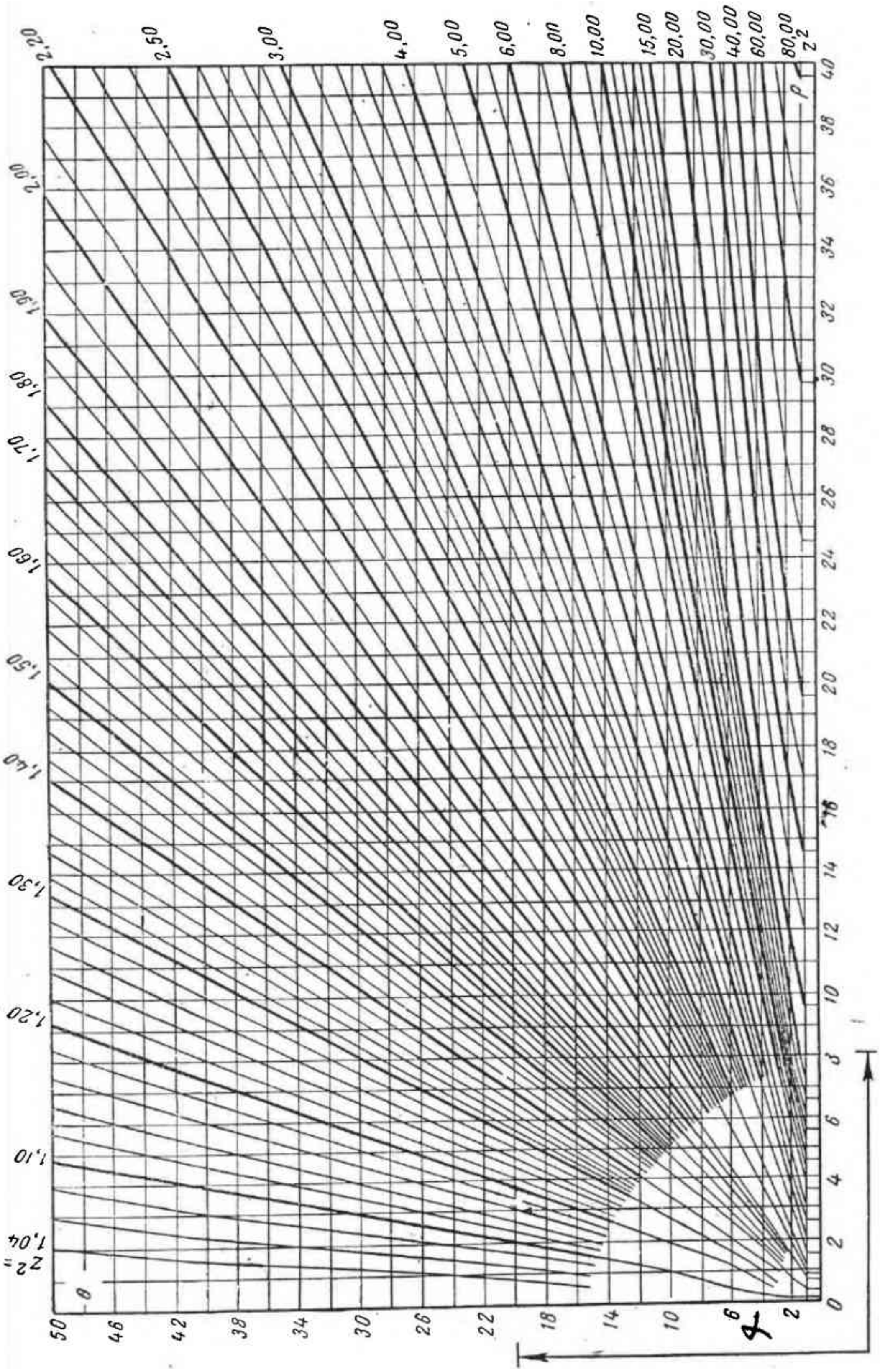


Рис. 88. Диаграмма для определения максимального давления от гидравлического удара в простом трубопроводе при равномерном закрытии турбины.

криволинейная зависимость заменена прямой линией. Влияние изменения расхода турбины, связанного с гидравлическим ударом, учитывается в номограммах.

Прямая *CD*, касательная к наиболее крутой части кривой *AB*, определяет эквивалентное время закрытия нетто для использования в уравнении (54) применительно к графику Аллиеви.

Время закрытия нетто может быть получено от завода-поставщика. Ориентировочно время закрытия нетто *

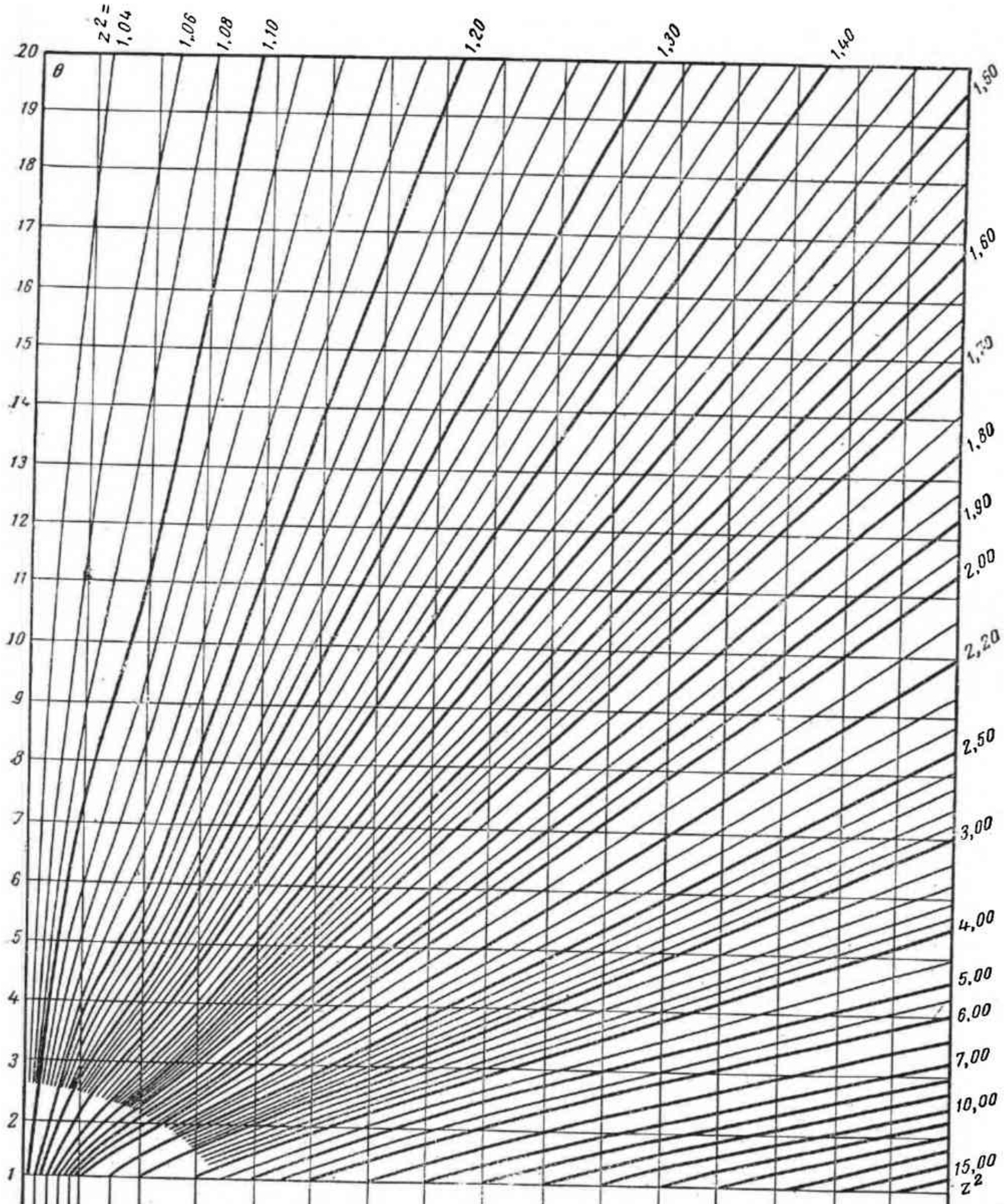


Рис. 89. Диаграмма для определения максимального давления от гидравлического удара для малых значений ρ и θ.

можно принять равным 60% номинального времени регулятора. Полученные таким образом результаты приблизительны; если необходимо получить точное решение, то нужно воспользоваться численным или графическим методом расчета.

2. Графический метод расчета удара. Графический метод расчета гидравлического удара состоит в изображе-

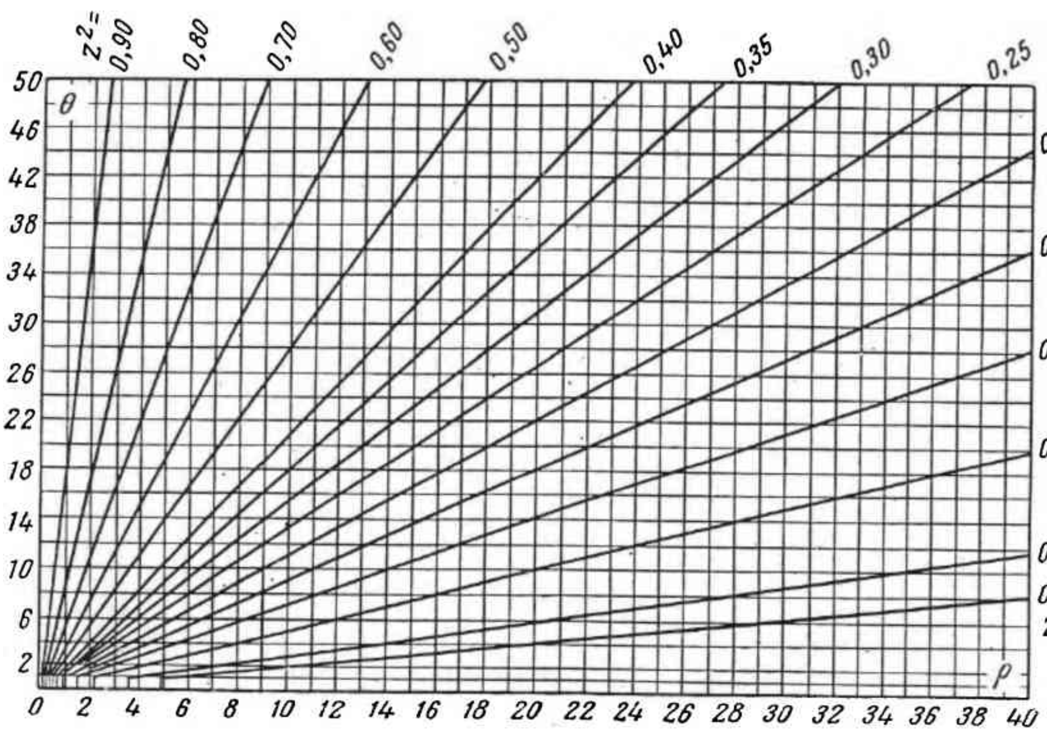


Рис. 90. Диаграмма для определения максимального падения давления в простом трубопроводе при равномерном открытии турбины.

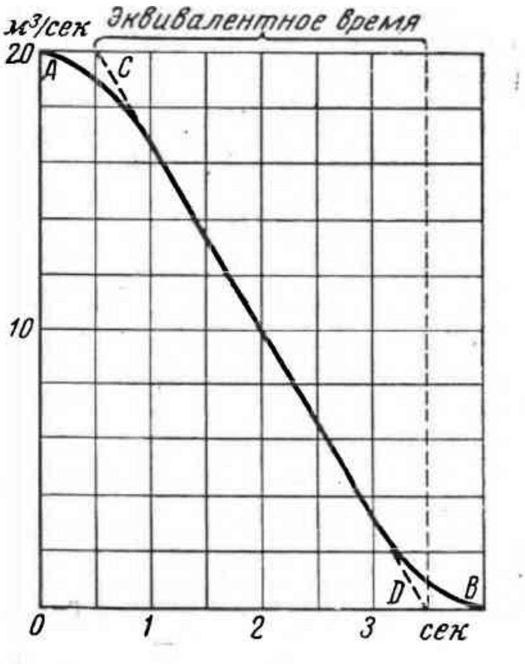


Рис. 91. Типовая связь между расходом турбины и временем ее закрытия (турбина без трубопровода).

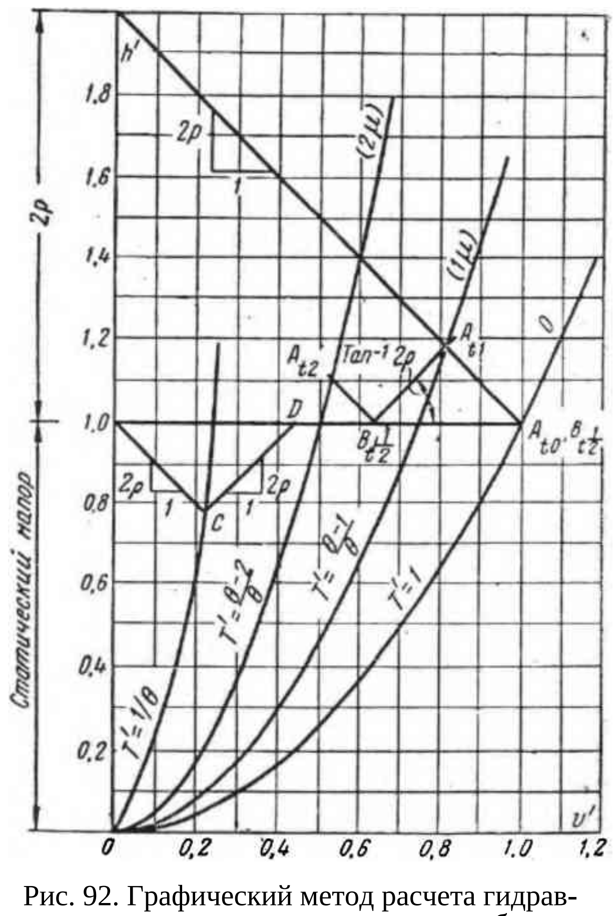


Рис. 92. Графический метод расчета гидравлического удара при закрытии турбин.

нии серий парабол, каждая из которых представляет собой расход, проходящий через ’направляющий аппарат турбины за время изменения режима, и серий прямых, представляющих собой давления, зависящие от прямого или непрямого гидравлических ударов.

С индексом нуль в дальнейшем будут изображаться начальные условия, а нижние индексы будут соответствовать относительным величинам напора, скорости и т. п.

Зависимость скорости воды в трубопроводе от открытия направляющего аппарата турбины и напора в безразмерных величинах дается выражением

$$v' У/г', \qquad (57)$$

где

$$Ио \quad {}^{h}\sim 7Г, {}^{u} « = - \quad \frac{в}{B_o}; \qquad (58)$$

^0 открытия направляющего аппарата.

Для постоянных толщины стенок и диаметра турбинного трубопровода значения гидравлического удара записываются в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} h'_{B_{t_{1/2}}} - h'_{A_{t_1}} &= -2\rho\left(v'_{B_{t_{1/2}}} - v'_{A_{t_1}}\right); \\ h'_{A_{t_1}} - h'_{B_{t_{1^1/_2}}} &= +2\rho\left(v'_{A_{t_1}} - v'_{B_{t_{1^1/_2}}}\right), \end{aligned}\right\} \qquad (59)$$

где h — напор у затвора в момент времени /р

h_B — напор в верхнем участке трубопровода в момент времени $/_{]1/3}$ ($Ч_2$ интервала);

$^v{}_{At]}$ — скорость в конце трубопровода в момент /р

Р — параметр, определяемый уравнением (53).

Для решения уравнений (57) и (59) графически построены диаграммы, ■изображенные на рис. 92. Сперва строится семейство парабол, выходящих из начала координат. Каждая парабола строится для определенного открытия направляющего аппарата турбины. На диаграмме кривая а=1 дает соотно-

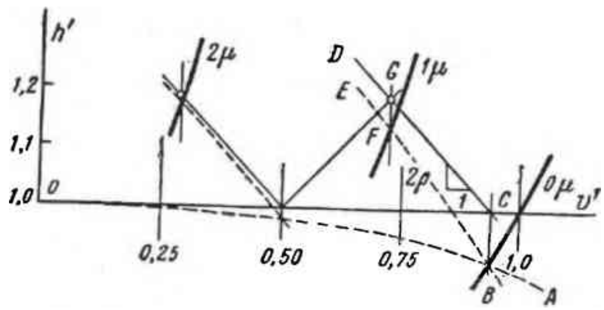


Рис. 93. Графический метод учета сил трения

шение между h' и u' для начального открытия по уравнению (57), и кривая

аТ 6

для открытия затвора в конце первой фазы. Из точки *1* проводится линия с уклоном —2р, которая пересекает параболу в точке $A_{(i}$. Эта линия представляет собой первую прямую уравнения (59). Далее проводится линия через Л с уклоном -J- 2р, пересекающая прямую А — 1 в точке , и т. д. Координаты точек A_{fs} показывают напор и скорость в нижней части турбинного трубопровода в конце фаз 1, 2 и т. д., а координаты точек B_t ,

показывают скорости в верхней части трубопровода в конце полуфаз 1, 2 и т. д. Кривая связи давления со временем для нижнего участка трубопровода получается нанесением значений напора для точек $A_о$, A, $A_м$ соответствующих временам 0, $\frac{}{a}$, $\frac{}{a}$ и т. д.

Если потери напора на трение в трубопроводе составляют значительный процент по отношению к общему напору, то они должны быть учтены. Это может быть сделано графически; предполагается, что трение действует как бы сосредоточенно в отдельных точках трубы. Чем больше число точек выбирается для определения трения, тем больше точность расчета. В обычных случаях вполне достаточно предположить, что трение сосредоточено у турбины. Рис. 93 показывает метод учета трения. В первую очередь вычерчиваются параболы 0ц, 1ц, 2ц,

представляющие "собой связь напора со скоростью, для различных значений открытия направляющего аппарата турбины. Линия *OA*, *вычерчиваемая* ниже оси y', характеризует величину потерь напора в трубопроводе. Далее диаграмма начинается с точки *C*, расположенной на оси *v'* над точкой *B*, которая представляет собой пересечение параболы для начального открытия и кривой трения. Линия *DC* прочерчивается через *C* с уклоном —2р, и тогда линия *EB* вычерчивается под линией *DC* на величину потерь на трение. Эта линия пересекает параболу к моменту первой фазы в точке *F*. Вертикальная линия, проведенная через *F*, пересекается в точке на *DC*, которая дает величины скорости и напора в конце первой фазы. Такое же построение проделывается для остальных интервалов.

„Хотя полное время закрытия обычной гидравлической турбины намного больше фазы удара, может иметь место такое положение направляющего аппарата, при котором время его закрытия до нуля равно фазе удара. Увеличение давления при таком закрытии соответствует прямому удару и может быть больше, чем повышение давления при полном закрытии турбины до нуля. ' Поэтому желательно провести исследование для различных закрытий. Следует отметить, что время работы регулятора необязательно пропорционально времени закрытия направляющего аппарата. При отсутствии точных данных время частичного закрытия условно принимается пропорциональным времени полного закрытия турбины.

Поскольку на гидроэлектростанции, как правило, время закрытия больше фазы удара, то максимальное повышение давления имеет место у Турбины), и если диаметр и толщина стенок трубопровода постоянны, то давление равномерно уменьшается до нуля по длине трубопровода. Если трубопровод имеет переменный диаметр, вполне достаточно для расчета предположить, что величина наибольшего повышения или понижения давления у турбины уменьшается до нуля у свободной поверхности воды в резервуаре или напорном бассейне и в любой точке *k* имеет следующее значение:

$$^{h}k \text{ ----------------} \frac{Ц\text{-} l_2 v_2}{} \text{ту--------}\sim \frac{l_k v A}{}, \qquad (60).$$

где h_k — давление от удара в точке *k;*

h — гидравлический удар у тур* бины;

V —- средняя скорость для всего* трубопровода по формуле (52);.

E — полная длина трубопровода,, включая высоту резервуара.

В некоторых случаях для уменьшения давления в трубопроводе устраивается холостой выпуск.

Если время работы регулятора меньше величины

$$\frac{Lv}{Ж'}$$

то холостой выпуск необходим.

Величина гидравлического удара на участке трубопровода между уравнительным резервуаром и напорным бассейном существенно меньше, чем в турбинном трубопроводе. Гидравлический удар в основании стояка резервуара перемещается без изменения своей величины по водоводу к верхнему бьефу до точки, определяемой следующим уравнением:

$$^{z}c = \wedge> \qquad (62)$$

где $/_c$,— расстояние от бьефа до рассматриваемой точки;

■ CL_c — скорость движения волны удара в водоводе;

T — полное время закрытия или открытия затвора.

От этой точки величина удара линейно уменьшается до нуля у напорного бассейна.

В некоторых случаях расчетная длина по формуле (62) получается большей, чем длина водовода; это решение условно, и потому можно принять, что повышение давления уменьшается от некоторого значения в стояке резервуара до нуля у водоприемника. Точный расчет проскока гидравлического ударd в деривацию дан Каламом и Гаденом.

Учитывая приближенность приведенных методов расчета, необходимо вводить некоторые коррективы в полученные значения гидравлического удара. Так, для трубопровода с постоянными диаметром и толщиной стенок при 'использовании номограмм коэффициент на увеличение гидравлического удара равен 1,05, а при графическом методе— 1,0. Для трубопроводов с переменными диаметром и толщиной в результате расчетов, выполненных по методу номограмм, следует вводить коэффициент 1,1, а по графическому методу — 1,05.

22. НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРАВНИТЕЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Уравнительный резервуар, как правило, располагается как можно ближе к зданию ГЭС и по возможности на более высокой отметке, с тем чтобы свести к минимуму длину турбинного трубопровода и уменьшить высоту резервуара. Если резервуар расположен достаточно высоко, то стояка, указанного на рис. 94,*а*, не делают и резервуар располагают непосредственно на бетонном фундаменте, включающем в себя водовод и отверстия для сброса воды из резервуара (схема *б* на рис. 94).

На схемах *виг* на рис. 94 показаны резервуары с дополнительным сопротивлением. Отличительной чертой этих резервуаров является устройство суженного отверстия в месте сопряжения резервуара с трубопроводом. Назначением сжатого отверстия является уменьшение амплитуды колебания уровня воды в резервуаре при сбросах и набросах нагрузки. Размер отверстия может быть рассчитан для любой величины проскока гидравлического удара из турбинного водовода в деривационный. Если отверстие велико, резервуар становится простым и уменьшением напора на сопротивление можно пренебречь. При бесконечно малом отверстии проскок удара равен величине гидравлического удара для водовода без резервуара.

Размеры отверстия назначаются из условия равенства давлений в трубопроводе у резервуара от проскока удара и от подъема уровня воды в

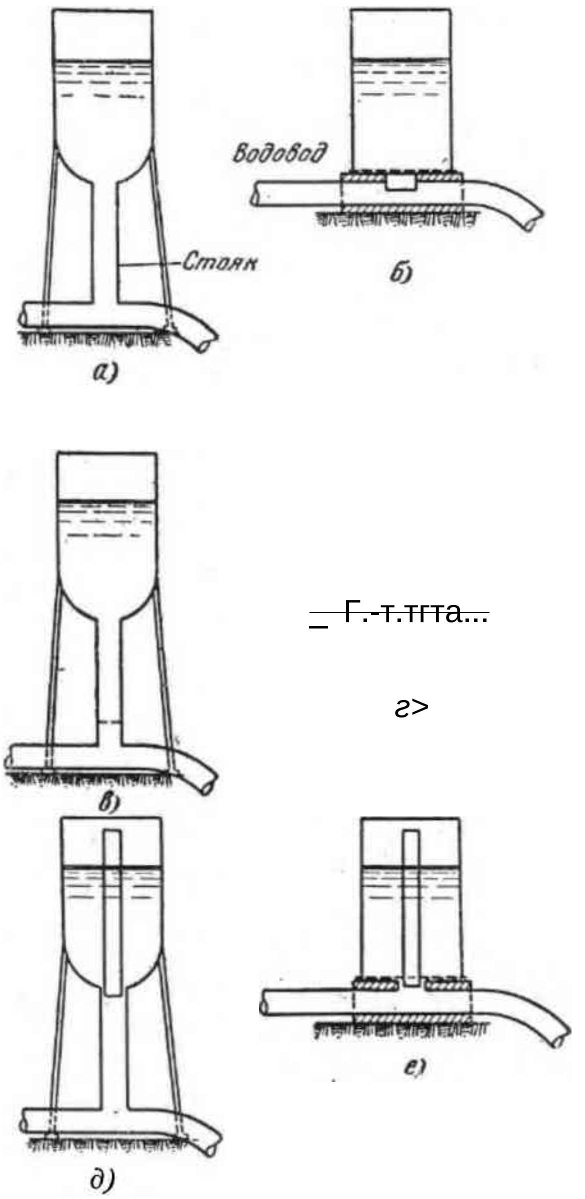


Рис. 94. Типы уравнительных резервуаров.

б — простые резервуары; *в, г* — резервуары с дополнительным сопротивлением,\ *д, е* — дифференциальные резервуары.

резервуаре при полном сбросе нагрузки.

Резервуары с сопротивлением дают большую экономию по сравнению с простыми, но вызывают некоторые пульсации напора в трубопроводе, в отдельных случаях влияющие на работу регулятора турбины.

Схемы *д* и *е* на рис. 94 представляют собой дифференциальный уравнительный резервуар. Этот тип является промежуточным решением между простым и резервуаром и резервуаром с сопротивлением. Он отличается от простого резервуара только наличием внутреннего стояка сравнительного малого диаметра. В основании стояка

имеются кольцевые отверстия, соединяющиеся с внешним цилиндром резервуара; площадь этих отверстий должна быть специально рассчитана.

В дифференциальном резервуаре при открытии турбин вода сперва понижается во внутреннем стояке, создавая большие ускорения воды в деривационном трубопроводе. Уровень воды в резервуаре падает медленней, причем через отверстия в основании стояка вода из резервуара поступает в трубопровод.

Теория колебаний воды в уравнительном резервуаре достаточно сложна, и потому.на предварительных стадиях проектирования могут быть использованы упрощенные методы расчета.

Поскольку уменьшение трения в водоводе увеличивает величину подъема уровня воды в резервуаре, значение коэффициента шероховатости должно соответственно подбираться для условий сброса и наброса нагрузки.

При определении максимального расхода воды через турбины следует иметь в виду, что гарантия завода-поставщика иногда несколько завышена. Поэтому необходимо учитывать некоторый коэффициент запаса. Часто принято рассчитывать уравнительный резервуар на полный сброс нагрузки с агрегатов, возникающий в результате короткого замыкания на линии передачи. Выбор расчетной величины наброса нагрузки для проектирования резервуара зависит от числа турбин, установленных на ГЭС, характера потребителей и других факторов. В больших системах внезапное изменение нагрузки обычно относительно невелико, но для отдельной ГЭС, несущей пиковую нагрузку, процент изменения может быть достаточно велик. Для ГЭС, ■имеющей больше одного агрегата и работающей в разветвленной системе, расчетным случаем будет наброс нагрузки от 3А до полной мощности.

Размеры уравнительного резервуара подбираются из условия получения наиболее экономичного решения при возможно большем диаметре резервуара, обеспечивающем устойчивость колебаний уровня и нормальную работу регуляторов турбин.

Процесс расчета резервуара (графический или аналитический) включает в себя прежде всего определение предельных положений уровня воды в резервуаре при расчетных величинах сброса и наброса нагрузки. Площадь сечения резервуара подбирается из условий устойчивости ■ колебаний уровня при малых изменениях нагрузки турбин.

Для определения минимального диаметра резервуара может быть использована формула Тома

$$D_{мин} = 1{,}13\text{-}|/\sim p \,| \quad y\, c_T \sim p\ ZgkH , \qquad (63)$$

где F_{ct} — площадь сечения стояка дифференциального резервуара;

— площадь сечения деривационного водовода;

L — длина водовода;

k — коэффициент в формуле потерь на трение

$$Потерь = ^{ku2},$$

H — наинизший напор нетто при полной нагрузке турбин.

Полученная величина диаметра для обеспечения нужного запаса на устойчивость увеличивается на 25% для дифференциальных резервуаров и на 40%' для цилиндрических.

При подсчете расстояния $/_c$ при проскоке гидравлического удара в водовод по формуле (62) для резервуаров с сопротивлением величина T принимается равной времени закрытия направляющего аппарата.

Для дифференциального резервуара время T может быть получено из следующего уравнения:

$$T = \frac{YF}{д\, \widetilde{иш}} \; 2, \qquad (64)$$

где T — время закрытия лопаток направляющего аппарата, *сек;*

F — площадь стояка резервуара, *м²;*

Y — максимальный подъем уровнр воды в резервуаре, ’ *м;*

v — скорость в водоводе до изменения режима, *м/сек;*

(о — площадь сечения водовода, *м,*

Следует помнить, что *F* 'может быть в специальных случаях меньше площади водовода. Для предварительных расчетов *F* может быть принято равным примерно 0,9со.

Избыточное давление в водоводе, вызванное колебаниями уровня воды в резервуаре, может возникать периодически при ускорениях воды в стояке, связанных с появлением гидравлического удара.

Изложенный прием может быть использован для расчета понижения давления в резервуаре при увеличении нагрузки. Особое внимание нужно обратить на до, чтобы давление в трубопроводе не становилось отрицательным.

При расположении ГЭС в холодном климате должен быть предусмотрен обогрев уравнительных резервуаров, если они выполнены открытого типа. Температура воды в резервуаре принимается равной 0° С. В расчет теплопотерь должны вводиться поверхность воды в резервуаре и поверхность стенок, охлаждаемых воздухом.

В холодном климате обычно принято устанавливать на резервуаре деревянную обшивку. Для этой цели на наружной поверхности резервуара устраиваются специальные кронштейны, на которые подвешиваются деревянные щиты на расстоянии 15 *ом* от стенки резервуара. Это пространство служит для циркуляции воздуха между обшивкой и стенкой резервуара. Обшивка обычно состоит из двух слоев пропитанных досок с руберойдом между ними.

При устройстве деревянного утепления приходится принимать во внимание защиту его от пожара, хотя расположение щитов высоко над землей и не создает особой опасности для окружающих стр оений.

В закрытых сверху резервуарах для входа и выхода воздуха из резервуара при колебаниях уровня должно быть предусмотрено специальное отверстие. В малых резервуарах устраивается узкая щель в кровле резервуара; на больших резервуарах устраиваются специальные двери, открывающиеся и закрывающиеся при входе и выходе воздуха. При нормальной работе резервуара двери закрывают вход к верхней камере для предупреждения потерь тепла. Для отопления резервуаров в холодную погоду используется циркуляция теплого воздуха между резервуаром и деревянными щитами. Специальные агрегаты, дающие тепло, должны быть рассчитаны таким образом, чтобы учесть потери тепла с поверхности резервуара.

Обычно нагревательная система выполняется с естественной циркуляцией, но в некоторых случаях может быть использована принудительная циркуляция. Имеются способы, обеспечивающие подачу теплой воды в резервуар у самого дна. В некоторых случаях вдувается воздух у дна резервуара для обеспечения циркуляции воды. Все методы дают примерно одинаковый эффект при условии, если устроено утепление. В расчетах необходимо учесть потерю тепла через утепление и рассчитывать соответственно нагревательную установку. При естественной циркуляции теплого воздуха особое внимание должно быть обращено на равномерное распределение воздуха по поверхности резервуара.

Система обогрева, аналогичная описанным ранее, использована успешно на установке Роки Ривер, Кобл Маунтен и др.

Для уравнительного резервуара Браун Фоллз открытый стояк диаметром 3,5 *м и* высотой около 60 *м* заключен в восьмигранную поддерживающую конструкцию, защищенную снаружи двухслойным покрытием из досок. На этой конструкции устроены лестницы для подъема на резервуар. Никакого обогрева воздушного пространства не производится. На площадке над резервуаром по верху стояка установлена решетка, к которой подключены 12 нагревательных агрегатов мощностью каждый до 3,8 *кет.* Агрегаты расположены вокруг всего стояка в кольцеобразном защитном пространстве. Никаких затруднений, связанных с обмерзанием, не наблюдалось, хотя температура воздуха в некоторых случаях опускалась до 15—20° С ниже нуля.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ТУННЕЛИ[1]

23. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

При строительстве гидротехнических туннелей 'решающее значение имеет геология. Как правило, туннель в прочной и крепкой скале без фильтрации будет наиболее экономичным сооружением в той степени, в какой это допускается вопросами безопасности, удобства монтажа и эксплуатации. Однако при проведении туннельных работ встречается много случайностей, на которые и должно быть обращено серьезное внимание. Люб.ая прочная скала имеет дефекты в виде трещин, каверн и напластований. Трещины могут быть источником фильтрации, зависящей от их размеров, и

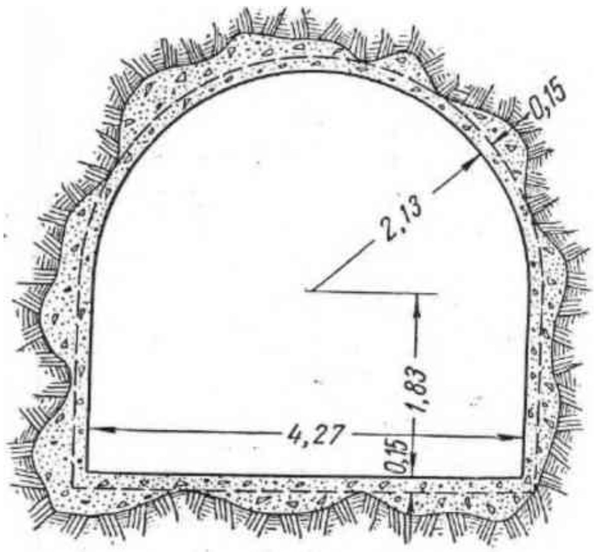


Рис. 95. Туннель Девис Бридж.

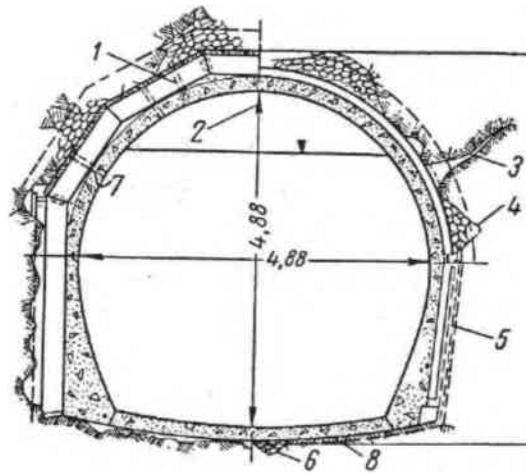
при слабо нарушенной скале она довольно устойчива. Каверны являются обычно источником неприятностей в туннельных работах; размеры их меняются от десятков сантиметров до тысяч метров и могут быть заполнены разрушенным материалом, который при проходке туннеля должен быть укреплен. В зависимости от геологических условий находится и размер туннельной выработки.

[1] Глава (переведена полностью, как содержащая многие интересные сведения о способах производства работ, скоростях проходки и конструкциях облицовок туннелей.

Размер туннелей при заданном расходе воды может меняться в довольно широких пределах. Однако имеется один размер, который наиболее экономичен.

Если туннель достаточно велик, чтобы разместить в нем все необходимое оборудование, используемое для его проходки, то в некоторых случаях такой туннель на 1 *пог. м* длины будет дешевле туннеля малого диаметра, в котором размещение оборудования затруднено.

Для средних условий США в хорошей, крепкой скале наиболее экономичным является диаметр 4,2—4,5 *м.*



Сечение на деревянных крепях ***Сечение на стальных крепях***

Рис. 96. Туннельный водовод Колорадо.

/ — трубки для нагнетания цементного раствора; 2 — нормальная поверхность воды; *3* — трещина; *4*— полость, заполненная обломками скалы или деревом, с последующей заливкой раствором; *5* — дренаж; *6* — заполнение камнем; *7* — отверстия для спуска грунтовых вод; *8* — дно дренажа (сечение типа В).

При облицованном туннеле экономические характеристики изменяются, и наиболее дешевым туннелем может оказаться туннель меньшего размера. Наименьшим сечением, допускаемым из условия эффективного использования экскаваторов, является сечение с размерами 2,5 X 2,5 *м.*

Туннели могут быть выполнены самых разнообразных размеров: так, деривационные туннели плотины Гувер имеют диаметр 15,25 ж, сбросной туннель около Марселя (Франция) при

длине 7 *км* имеет ширину 22 *м* и высоту 15,25 *м.*

Форма сечения туннеля при проходке через плотный грунт в зависимости от экономических и конструктивных соо(бражений может быть любой. Если проходимая порода недостаточно устойчива, форма поперечного сечения должна 'быть такой, чтобы обеспечить наилучшее сопротивление внешним усилиям. Никаких стандартов в этом вопросе пока не принято. Типичные поперечные сечения туннелей показаны на рис. 95—98.

Как правило, кровля туннеля поддерживается полуциркульной аркой. Для прочной скалы без бокового давления в туннеле могут быть приняты вертикальные стенки, как показано на рис. 95, при горизонтальном дне.

Туннели, проходимые в плотных грунтах или мягкой скале, при небольшом боковом давлении выполняются подковообразного сечения.

Туннели, проходимые в очень мягких грунтах, и туннели, подверженные значительным внешним давлениям, должны, как правило, выполняться кругового сечения. В расчетах должно быть учтено, что туннели часто опоражниваются, а уровень грунтовой воды за облицовкой повышается за счет фильтрации или утечек из водохранилища, что обусловливает увеличение давления за облицовкой.

В некоторых случаях в облицовке туннеля устроены дрены для снятия внешнего давления при опорожнении. Однако такие дренажные отверстия неудобны, поскольку в период нормальной работы туннеля через них может происходить утечка воды в породу. Туннели, выполненные в скале и подверженные неравномерному давлению воды извне, могут и не быть кругового очертания, но облиЦовка должна быть рассчитана на восприятие полного давления. Наиболее употребительной формой поперечного сечения для средних условий внешнего давления является сечение подковообразной формы.

В мягких грунтах дно туннеля должно быть рассчитано на вес облицовки туннеля и пригрузку сверху, поэтому днище должно быть достаточно

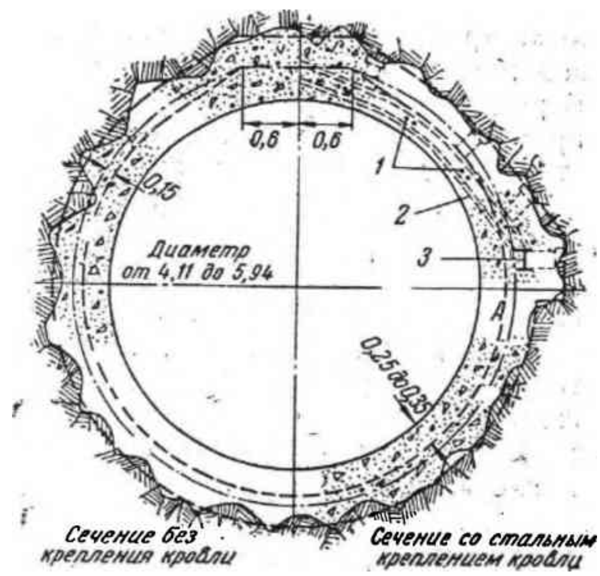


Рис. 97. Туннель Делавэрского водовода.

1 — анкерные стержни (сечение типа А); *2* — стальные ребра; *3* —опоры стальных ребер.

толстым или очерченным в виде обратного свода, для того чтобы распределить боковое давление по всей площади.

Туннели с железобетонной облицовкой, служащей для восприятия внешнего давления, должны быть кругового сечения, что является наиболее экономичным решением.

Глубина заложения туннеля в значительной степени определяется геологическими условиями. Как правило, туннель располагается ниже разрушен-

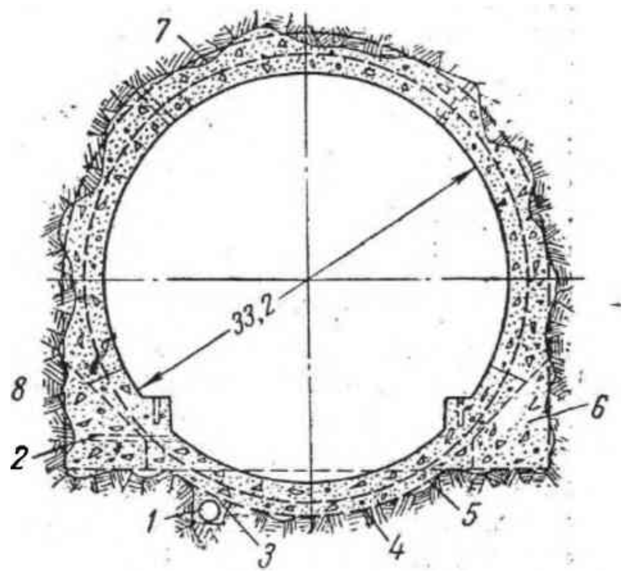


Рис. 98. Раздельный Континентальный[4] туннель.

1 —дренаж; *2*—отверстия для спуска грунтовых вод просмоленная прокладка; *4*—рабочая линия; 5 ния экскавации; *6* — заполнение; 7 — торкрет; *g*~ диальныи шов. , . , “ **ли-** **ра-**

них, трещиноватых или кавернозных зон или проектируется в обход их. **В** ряде случаев туннель целесообразно провести значительно ниже этих областей для достижения плотной скалы.

Если облицовка туннеля армируется для восприятия внутреннего давления, минимальная допустимая глубина от поверхности грунта до верха туннеля должна (быть достаточной для того, чтобы уравновесить внутреннее гидростатическое давление в туннеле независимо от прочности скалы; этот критерий может быть сформулирован следующим образом: минимальное допустимое расстояние в метрах от поверхности земли до верха туннеля должно быть равно не менее, чем 0,7 максимального гидростатического напора в метрах внутри туннеля, если только туннель не армирован для восприятия внутреннего давления.

В неустойчивых грунтах при проходке туннелей монтируются специаль**ные** крепи для удержания окружающей породы до устройства постоянной облицовки. В туннелях, проходимых **в** мягких породах, крепи устраиваются временного типа, поскольку облицовочные работы непосредственно следуют за выемкой грунта. Туннели **в** скале обычно проходят на всю длину, и только после этого начинаются работы по облицовке; поэтому крепи должны поддерживать породу до окон**чания** облицовочных работ, на что требуются месяцы или годы.

В качестве крепежного материала используются дерево и сталь. Конструкция крепей состоит из деревян**ных** рам и стальных полигональных **ферм** с закладкой промежутков, между ними металлическими или деревянными элементами. В сыпучих или слабых грунтах стальные рамы могут использоваться с обшивкой из стальных листов или рифленого железа. Сталь**ные** крепи обычно дороже деревянных, **но при** длинных туннелях эти затраты вполне оправдываются. Размер и расстояние между рамами определяются опытным путем для каждого туннеля **по мере** его проходки. Как деревян**ные,** так и стальные крепи разруша**ются,** если они остаются незащищен**ными** в туннелях с повышенной влажностью; поэтому не приходится рассчитывать на длительный срок их работы. Возможным решением является включение стальных каркасов в бетонную облицовку туннеля.

Пространство между облицовкой и выработкой должно быть заполнено тем или иным материалом, с тем чтобы обеспечить равномерное распределение нагрузки на облицовку. Наиболее употребительным материалом является торкрет.

Туннели могут быть сооружены в разных грунтах различными методами проходки. При проходке в мягких грунтах предполагается образование свода над поверхностью туннеля. Должно быть также учтено положение уровня грунтовых вод. Могут быть использованы следующие методы проходки.

24. СПОСОБЫ ПРОХОДКИ ТУННЕЛЕЙ

1. Щитовой способ проходки. Щитовой метод проходки осуществляется с помощью стального щита, проталкиваемого вперед гидравлическими домкратами, опирающимися на чугунные или стальные сегменты (тюбинги), которые обычно образуют облицовку туннеля. Тип щита в значительной мере зависит от разрабатываемого материала; в связных материалах, таких, как сухая глина, цементированный гравий, используется обычно открытый тип щита. По мере продвижения щита его острые режущие кромки врезаются в материал и сбрасывают его в туннель, откуда он удаляется транспортерами, породоуборочными машинами или другими средствами. В таких грунтах, как мягкие глины или плывуны, используется шлюзовой тип щита. Головная часть щита вдавливается в грунт, и грунт проходит в туннель через отверстия в щите.

Подводные туннели в мягких грунтах обычно проходятся с использованием сжатого воздуха. Щиты образуют воздушное пространство, которое служит переходной зоной между напорной стороной, где происходит экскавация, и стороной, открытой в атмосферу. Назначение сжатого воздуха — поддер-

жать грунт до установки облицовки. Проходка туннелей щитовым способом крайне дорога.

2. Тюбинговый способ проходки. Тюбинговый способ проходки используется при любых грунтах, которые могут сохраняться, не осыпаясь, на небольшом пространстве, равном площади крепей до установки облицовки, В этом методе используются стальные элементы (тюбинги), покрытые антикоррозийными составами, размером 50X100 *см* при толщине 4—10 *мм.* Все четыре края тюбингов выполняются в виде фланцев шириной 5 *см.* Для каждого кольца установка тюбингов начинается с центра свода. Верхний опалубочный элемент крепления убирается, и на его место устанавливается тюбинг. По мере уборки элементов они заменяются тюбингами. При уборке элементов крепления по всему периметру выработки туннель продвигается вперед на 50 *см.* В туннелях диаметром больше 3 *м* облицовку из тюбингов необходимо усиливать специальными ребрами, как показано на <рис. 99. Ребра жесткости имеют форму тавра или двутавра и сболчиваются с фланцами каждого тюбингового кольца.

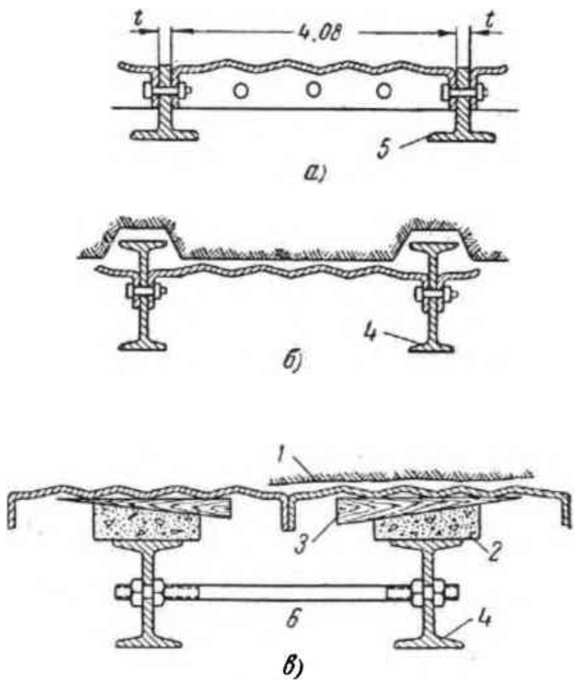


Рис. 99. Схема крепления.
1 — линия экскавации; *2*— заранее отлиты?! цементный блок; *3* — клин; ?— двутавровая балка; 5 — часть двутавровой балки; *6* — стягивающий болт.

3. Проходка полным профилем. При проходке туннелей методом полного профиля туннель проходится за каждый взрывной цикл на полное сечение. Использование в этом случае буровой рамы позволяет применить этот метод для любого сечения. Так, сбросные туннели плотины Гувер, туннели водопровода из р. Колорадо и Делаварский водовод, представляют собой характерные примеры такого метода проходки.

Цикл операций при методе полного профиля, как показано на рис. 100, представляет собой следующее:

а) Бурение. Бурение выполняется автоматическими пневматическими бурами, смонтированными на буровой раме-тележке «Джумбо». Расположение буровых отверстий определяет количество скалы, выламываемой при взрыве, и зависит от размера туннеля и прочности скалы. На рис. 101 показано характерное расположение шпуров для водовода (р. Колорадо) при диаметре туннеля 4,87 *м.* Номера на чертеже указывают очередность взрывов.

Глубина шпуров колеблется обычно от 1,5 до 4,5 *м* и редко бывает больше ширины туннеля. Шпуры, показанные на рис. 101, имели длину 1,8—3 *м.* На Делаварском водоводе туннели диаметром 5,25 *м* имели шпуры глубиной 3,65—4,25 *м.*

б) Взрывание. При подготовке ко взрыву забоя тележка «Джумбо» откатывается назад примерно на 50 *м* в безопасную зону. Количество взрывчатого вещества, используемого при зарядке шпуров, меняется в зависимости от условий работы. Обычно оно составляет 0,45 *кг* на 1 $м^3$ для гравия и мягкой скалы и около 3,2 *кг* для твердой скалы. Наиболее часто используется желатиновый динамит со взрывной способностью 40—60%. Взрывы ведутся в таком порядке, чтобы обеспечить взрывание наибольшего объема породы.

, в) Уборка породы. Как только атмосфера в забое очищается от дыма и газов, породоуборочная **машина** продвигается к породе, как показано на рис. 102. На практике используется много различных типов **ма-**

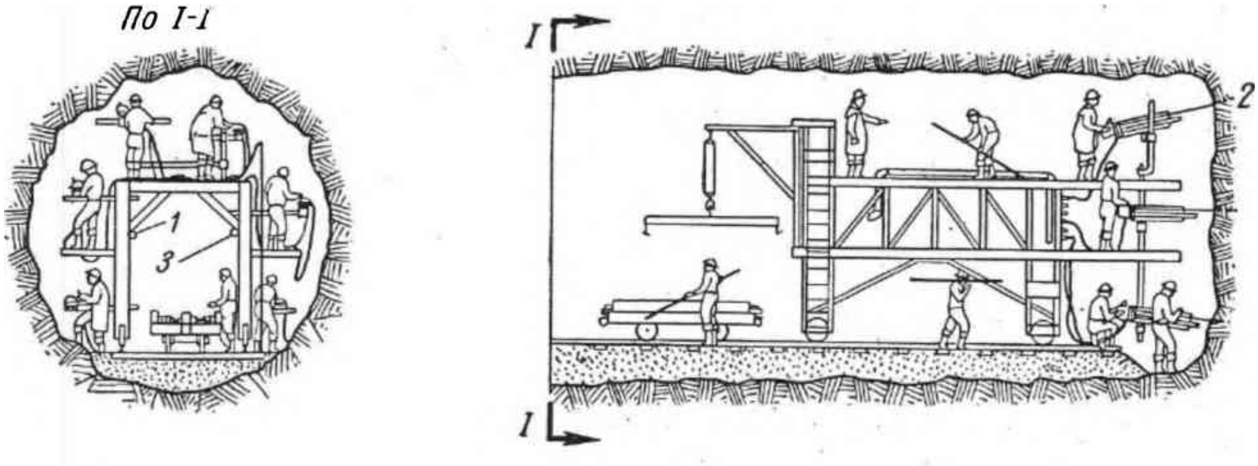
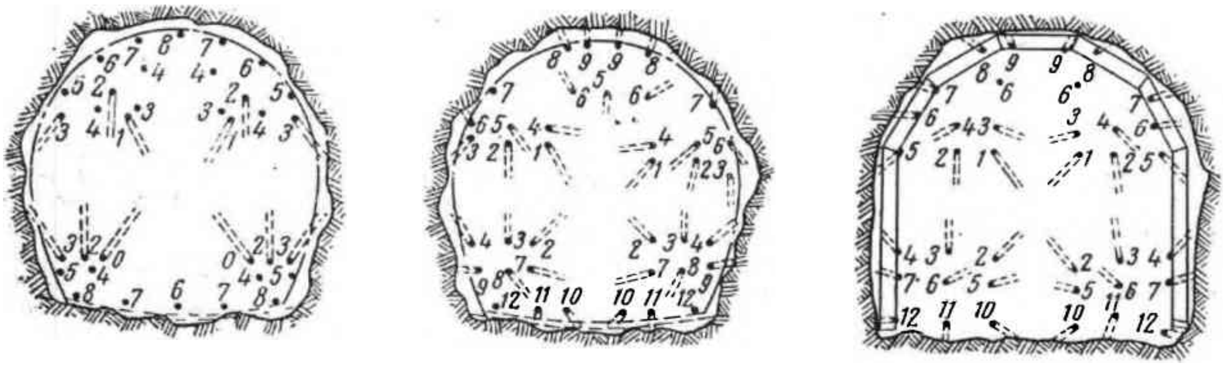


Рис. 100. Проходка туннеля полным -профилем.
1 — вентиляционный трубопровод; *2* — забуриваемая порода; *3* — водопровод.



О,) б) б)

Рис. 101. Схема буровых скважин для проходки полным профилем.

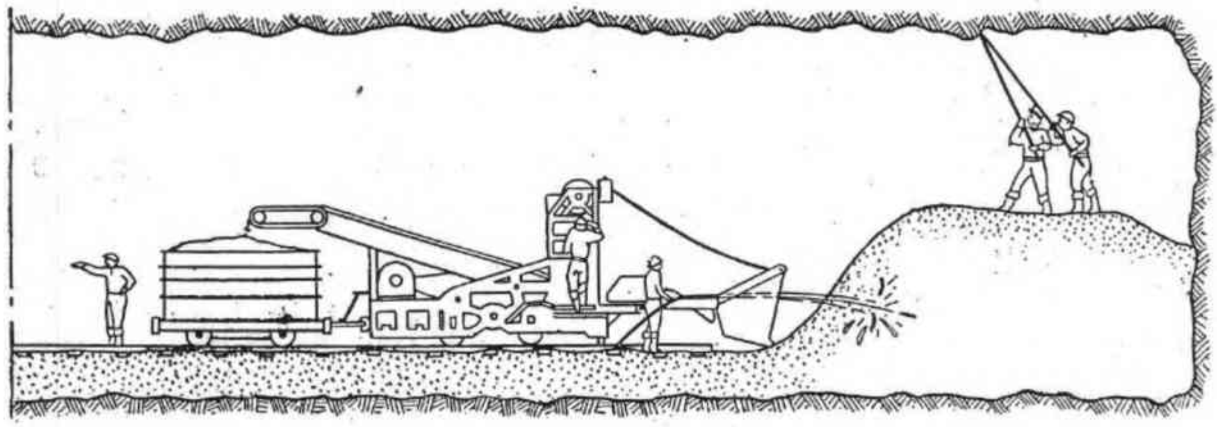


Рис. 102. Уборка породы при проходке полным профилем.

шин, выпускаемых промышленностью, но машина Конвей, показанная на рис. 103, является наиболее распространенной при проходке как малых, так. и больших туннелей. Эта машина очець хорошо приспособлена для очистки взорванной скалы и подравнивания углов. Скорость операций по уборке породы определяется временем обмена вагонеток. На Делаварском водоводе смена вагонеток осуществлялась консольным краном, укрепленным на буровой тележке, как показано на рис. 104.

г) Крепле'ние кровли. Если туннель требует крепления, как это

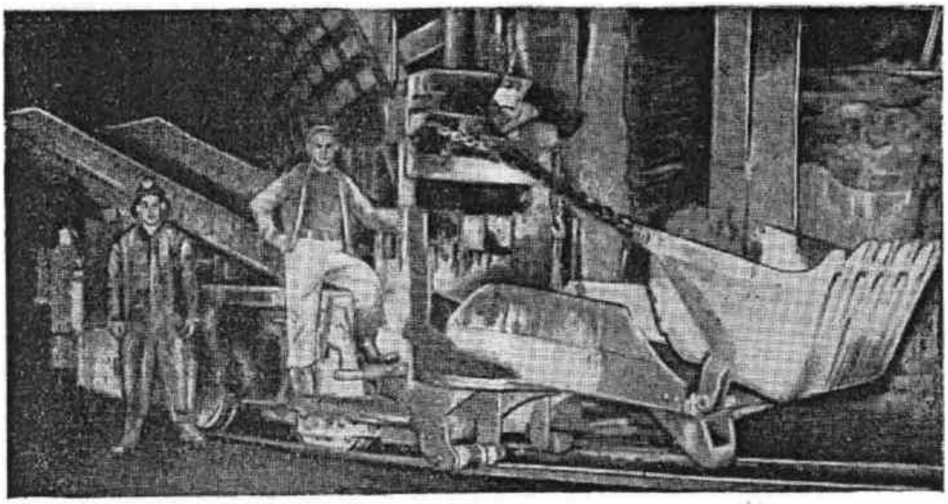


Рис. 103. Породоуборочная машина Конвей.

рассматривалось раньше, то крепи устанавливаются с буровой тележки после каждой ее подвижки (рис. 105).

д) Подчистка. Как показано на рис. 106, специальная бригада подчищает выработку до требуемых 'размеров туннеля.

е) Очистка обратного свод а. Часть взорванного материала остается на дне туннеля, с тем чтобы обеспечить необходимую отметку для операции по проходке. После того как проходка выполнена на очередном цикле, материал со дна туннеля уби-

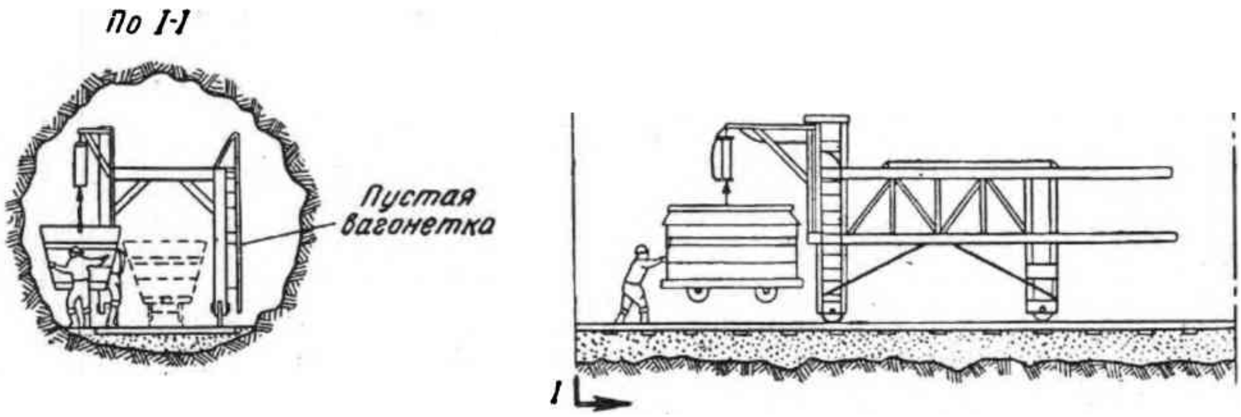


Рис. 104. Консольный перебрасыватель вагонеток.

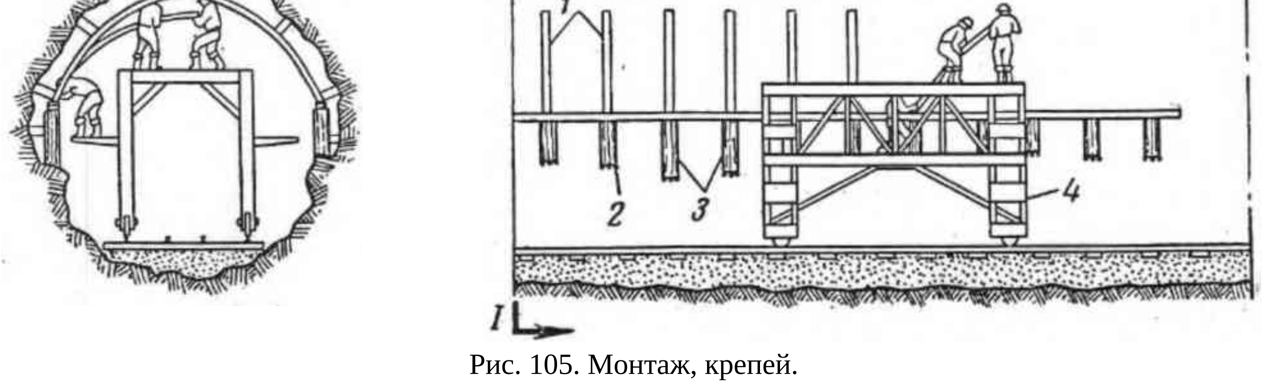


Рис. 105. Монтаж, крепей.

/—стальные ребра; 2 — стальные стержни; *3* — деревянные столбы: *4*—буровая тележка.

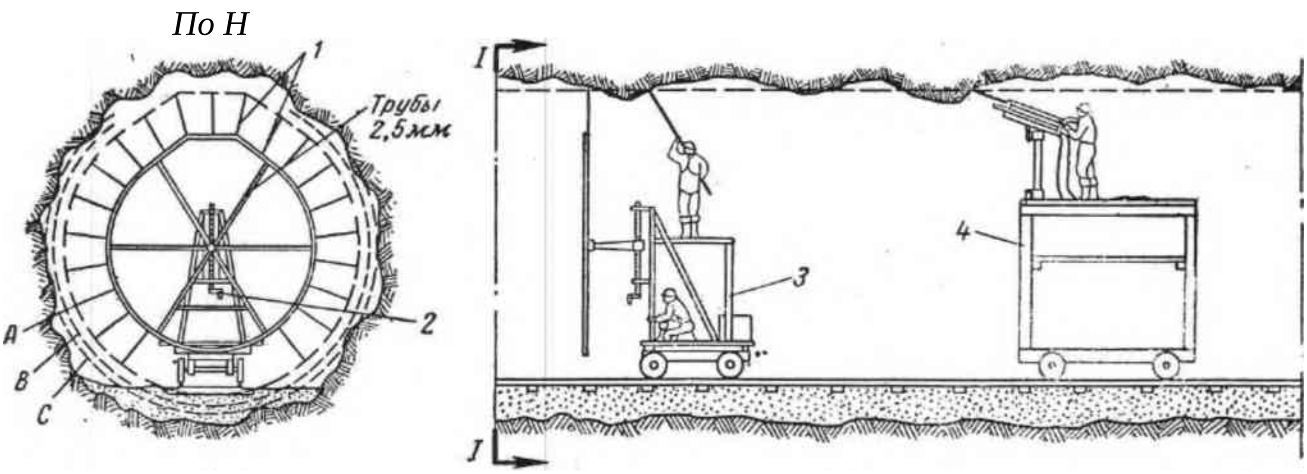


Рис. .106. Подчистка туннеля до полного профиля.

1~ трубы 25 *мм; 2* — установочный винт;.? — платформа для ручной разбивки; *4* — платформа для обуривания.

рается перед установкой облицовки, Метод, показанный на рис. 107, применялся на Дел аварском водоводе. Он состоит в использовании ковша породоуборочной машины в качестве драглайна с помощью длинной стрелы, прикрепленной к машине.

4. Метод проходки с помощью верхнего направляющего хода. Он состоит в проходке верхней части туннеля с опережением на один цикл от основного туннеля (на 1,5—4,5 *м)* и часто применяется в некоторых крупных туннелях. Шпуры в верхнем ходе пробуриваются с вертикальных стоек, установленных на дне хода. Этот метод позволяет облегчить крепления верха туннеля.

При использовании наиболее экономичного оборудования при проходке туннелей можно добиться большой скорости проходки при малой стоимости работ. Однако скорость проходки в значительной степени зависит от характеристик породы. В табл. 6 приведены средние скорости проходки за 24 *ч* для нескольких типичных туннелей в скале. Максимальная скорость проходки туннелей, приведенных в таблице, меняется от 16 до 20 *м/сутки.*

5. Переборы породы. Особое значение при оценке работ по проходке туннелей имеет вопрос переборов породы. Под переборами понимается фактически выбранная скала в дополнение к той, которая оконтуривается проектной линией выработки. Так, на рис. 108 площадь поперечного сечения туннеля в свету, т. е. площадь его живого сечения, составляет 14,4 ж^2, в то время как площадь проектной или так называемой «чистой» линии выработки равна 18,6 ж^2, а площадь, очерченная линией фактической выработки, составляет 23,2 *м*^{2}. В этом случае перебор составляет 23,2——18,6=4,6 ж^2, или 25%. Однако исчислять процент перебора по отноше-

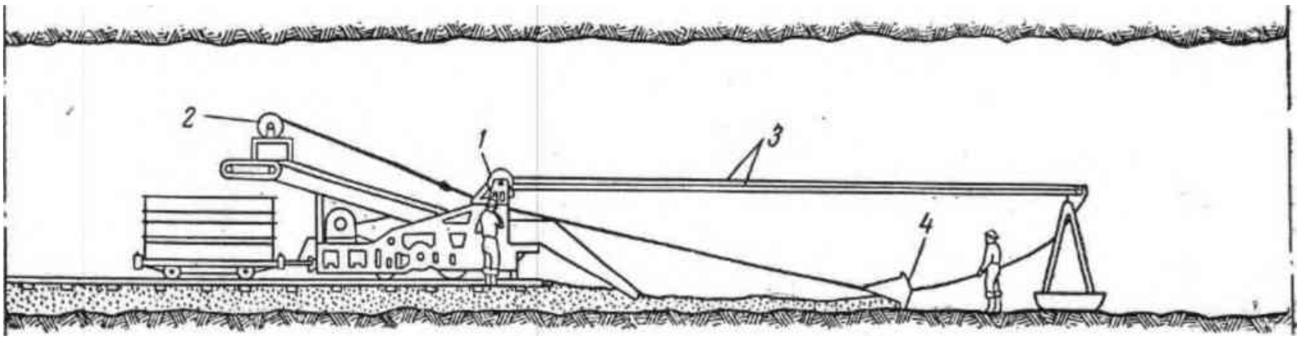


Рис. 107. Расчистка обратного свода.

1 — породоуборочная машина; *2* — подъемник; *3* — трубчатые балки; *4*— ковш.

Таблица 6

Туннель	Место расположения	Год	Полная длина, *км*	Поперечное сечение, *м*			Скорость проходки в день (за три 8-часовые смены), *пог. м*
				Высота	Ширина		
Водовод Колорадо (сухой)	Калифорния	1939	115,8	5,3	5,2	Граниты, гнейсы, песчаники, конгломераты	6,45
Водовод Колорадо (мокрый)	То же	1939	32,2	5,3	5,2	Граниты, гнейсы (с фаутами)	3,4
Карлтон	Колорадо	1940	9,6	3,3	3,3	Гранит	14,4
Делавэрский водовод	Штат Нью-Йорк	1941	136,5	Диа иетр 5,2- -5,8		Серые песчаники	9,65
Континентальный	Колорадо	1942	20,9	Диаметр 3,8—5,5		Г ранит, сланцы	15,8
Апалачиа	Теннеси	1942	12,8	Диаметр 5,5—6,7		Кварциты	8,45

нию к проектной выработке туннеля неправильно.

Фактические переборы в значительной степени зависят от характера скалы и умения, с которым 'производятся бурение и взрывы. Для туннелей в скале, требующей крепления, которое не может быть убрано до устройства облицовки, переборы происходят, как правило, за счет размеров крепей. В расценках на строительные работы необходимо ограничивать переборы, поскольку при увеличенных переборах выбирается излишняя -скала и укладывается более толстый слой бетона. Поэтому общепринятым является установление расценок на некоторую предельную линию выработки, которая также называется «линией оплаты», за пределами которой ни выработка, ни бетон не оплачиваются.

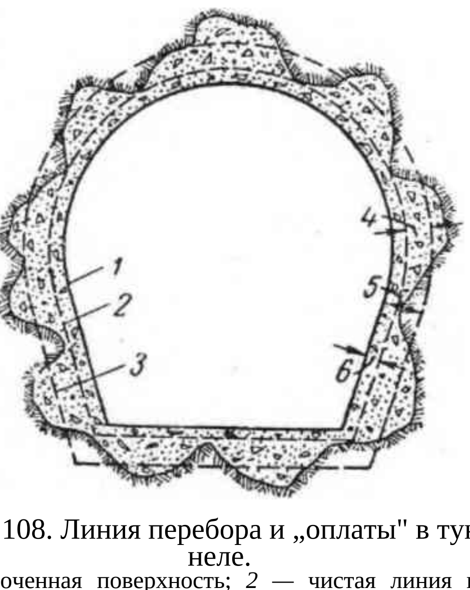


Рис. 108. Линия перебора и „оплаты" в туннеле.

1 — смоченная поверхность; *2* — чистая линия выработки; *3* ~ линия „оплаты"; *4* — перебор; *5* — средняя толщина; *6* — толщина нетто.

Для туннелей, проходимых без креплений, «линия оплаты» и линия выработки обычно совпадают. Эти линии располагаются на постоянном расстоянии от проектной линии выработки как можно ближе к вероятной средней действительной выработке, которая устанавливается с большой тщательностью. В табл. 7 приводятся данные о средних переборах для некоторых туннелей. Можно заметить, что, за исключением нескольких случаев, переборы не превышают 30 *см*. Для туннелей в скале, в которой крепи остаются на месте, входя в контур облицовки, линия оплаты для выработки выдвигается наружу на расстояние, эквивалентное пространству, занимаемому крепями. Это пространство значительно изменяется в зависимости от размера туннеля и характера породы.

Переборы очень непостоянны и при прочих равных условиях определяются прочностью скалы. Прочные изверженные метаморфические породы с малой трещиноватостью практически дают фактическую линию выработки, близкую к проектной; то же можно сказать и об осадочных породах при вертикальной стратификации; при горизонтальной стратификации переборы получаются несколько выше.

Термин «переборы» не применяется для туннелей, проходимых в мягких грунтах, поскольку в - этом случае можно проходить туннель с сечением>

№ тГп.	Туннель	Форма сечения	Размеры			
			Сечение туннеля		Полная выработка	
			Высота	Ширина	Высота	Ширина
>1	Водовод Вестон	в	2,82	3,05	3,05	3,05
2	» Вачузет	в	3,30	3,70	3,70	4,10
3	я ' Нью Кротон	А	3,20	3,20	4,10	4,00
■4	То же	В	4,10	3,20	4,70	4,75
5	Южный метрополитен, верхний коллектор	В	2,80	2,50	3,30	2,90
6	Установка Девис-Бридж	в	3,95	4,26	4,26	4,58
7	Нантагала	в	4,26	3,95	4,26	3,95
	Плотина Индиан Рок	А	4,58	4,58	5,40	5,49
* 9	„ Найтвиль	А	4,88	4,88	5,49	5,49
10	Серри Маунтен	В	3,05	3,05	3,65	3,66
И	Апалачиа	А	5,49	5,49	6,10	6, Го
12	Главный водовод Колорадо	В	4,88	4,88	5,27	5,19
13	Плотина Гувер	А	15,24	25,14	17,07	17,07
14	Западная ветвь Рондоут	А	4,10	4,10	4,10	4,54
35	Западная ветвь Кенсико	А	4,58	4,58	4,58	4,88
16	Кенсико Хилл Вью	А	5,95	5,95	5,95	6,55

Средняя величина перебора (за

весьма близким к (проектному. «Линия оплаты» для туннелей в мягком грунте располагается от проектной линии на расстоянии, которое необходимо для установки крепей. Это расстояние обычно больше 10 *см* и зависит от размера туннеля и типа креплений.

6. Облицовки туннелей. Обычно принято облицовывать туннели бетоном. Облицовка предназначена для получения гладкой поверхности, которая даст минимальную потерю напора, увеличение строительной прочности туннеля и уменьшение потери воды.

Требуемая толщина облицовки зависит от прочности поддерживаемой породы и способа проходки. Поскольку невозможно проводить выработку в точности по проектной линии, линия «средней выработки» * является той средней линией, до которой фактически выбирается порода; эта линия по существу и определяет среднюю толщину бетонной облицовки. Толщина нетто облицовки должна быть минимум 1'0—20 *см* в зависимости от размеров туннеля. Перебор или излишний материал, выбранный за пределами проектной линии, составляет для туннелей в устойчивой скале примерно 20 *см,* но может достигать при тяжелых креплениях 1 *м* и более. Средние переборы для туннелей в устойчивой скале составляют примерно. 30 *см.* Отсюда толщина облицовки с учетом практических соображений должна составлять минимум 30 *см* ив среднем 40—50 *см.*

Таким образом, можно отметить, что для туннелей не слишком большого сечения и для не очень прочной скалы минимальная толщина облицовки, назначаемая из конструктивных соображений, обладает достаточной прочностью/

Туннели в нескальных грунтах могут быть лишь (в (редких случаях пройдены без креплений. При этих, условиях размеры переборов очень невелики. В большинстве случаев крепления не убираются, й поскольку, как. правило, они выполняются из сталь-

Таблица 7

Площадь, л²			Процент переборов сверх проектного сечения	Перебор, *м*	Геологические условия	Тип креплений
Сечение туннеля в свету	Проектное сечение выработки	Фактическое сечение выработки 4				
7,06	8,06	11,8	44.4	0,33	Крупнозернистый гранит	Частично лесом
10,01	12,17	15,98	31,6	0,30	Глинистые сланцы	То же
8,24	13,75	20,62	50.4	0,45	Известняк	» »
5,48	18,86	25,46	35,0	0,38	Г нейсы	п »
5,48	7,34	10,78	47.5	0,31	Конгломераты	» »
14,96	17,19	19,70	14,0	0,15	Слюдяные сланцы	п
15,24	15,24	18,9 .	24,0	0,24	Темно-серые базальты	п п
16,44	23,60	32,24	36.5	0,45	Кварциты, филиты	
18,67	23,6	29,17	23.6	0,30	Кварциты, слюдистые сланцы	» »
7,71	11,06	17,9	62,0	0,21	Трещиноватый гранит	» »
23,60	29,17	36,6	25,0’	0,34	Кварциты	Очень мало дерева и стали
20,07	23,23	28,24	21.6	0,30	Граниты, гнейсы	Дерево, сталь
182,46	228,81	242,98	6, 1	0,27	Анденезитовые брекчии	То же
13,28	17,09	26, 10	17,0		Песчаники и глинистые сланцы 64%, „гнейсы 28%, известняки 8 %	Без крепей 18%, торкрет 39%, стальные крепи 13 y_0
16,44	20,53	28,89	10,0		Гнейсы и сланцы—96%, известняк—3%	Без крепей 2%, торкрет 57%, стальные крепи 41%
27,7	34,0	47,56	15,0		Гнейсы и сланцы 41%, гранит 51%, известняк 8%	Без крепей 1%, торкрет 8%, стальные крепи 91%

исключением № 3, 8, 14, 15 и 16) 0,285.

ных элементов, крепление включается в облицовку.

Точное определение внешних нагрузок, которым подвержена туннельная облицовка, практически невозможно. Поэтому в проекте должен использоваться имеющийся опыт строительства туннелей в аналогичных условиях. Для прочной скалы обычно применяется толщина облицовки 15- *см* для малых сечений и 30 *см*—для больших; для слабой скалы толщина облицовки чаще всего, бывает равна 20—30 *см,* а вместе с 25—45 *см* перебора в среднем толщина облицовки получается равной 45—90 *см.*

Обычно бетон для облицовок /подбирается с прочностью 210 *кг/см²*. При необходимости обеспечить высокую водонепроницаемость следует применять более высокие 'марки бетона. Поскольку толщина облицовок обычно невелика, для повышения пластичности бетона увеличивается расход цемента, обеспечивающий заполнение всех неровностей выработки. При минимальной толщине облицовки 15 *см* максимальный размер зерен инертных не должен превышать 25 *мм.* При минимальной толщине облицовки 30 *см* размер инертных ограничивается 40 *мм.*

Процесс устройства облицовки обычно начинается в первую очередь с обратного свода с последующим возведением на нем, как на прочной основе, стенок и свода. Единственной опалубкой, требуемой для бетонировки обратного свода, является крепление продольных швов. Они служат также в качестве направляющих для последующих операций. Боковые стенки и свод облицовки бетонируются за одну операцию независимо от того, устраивается ли непрерывная или секционированная облицовка. Большое число длинных туннелей бетонирова[в]лось с непрерывной укладкой стен и сводов, что позволяло произвольно устраивать строительные швы. Это оказалось возможным благодаря усовер-

шенствованию телескопических форм, которые обеспечивают легкое распалубливание и перемещение опалубки. Бетонирование ведется обычно или с помощью цемент-пушки, или с помощью бетононасосов; эти методы наиболее экономичны и могут быть рекомендованы для туннельных работ.

Для упрочнения скалы и уменьшения притока воды в выработку перед устройством облицовки в некоторых случаях выполняется цементация. Цементация за облицовку служит для заполнения пустот, образовавшихся между облицовкой и породой, и тем самым предупреждает концентрацию давления на облицовку. Для этой цели в облицовке оставляются отверстия, достаточные для пропуска цементационного и бурового оборудования. Бурение при этом должно быть проведено на глубину не менее 30 *см.* На Делаварском водоводе цементация за облицовку проводилась при давлении 42 *к,г!см?* для заполнения пустот, обеспечения связи между облицовкой и породой и заполнения возможных трещин и каверн.

Для длинных туннелей при значительной стоимости перевозки породы на большие расстояния целесообразно разбивать туннель на несколько участков, проходимых с различных заооев. Для доступа к забою устраиваются специальные шахты или боковые штреки. При расположении трассы туннеля должно быть обращено особое внимание на легкость доступа к туннелю.

Шахты обычно выполняются круглого или прямоугольного сечения. В некоторых случаях при проходке мягких пород используются стальные или железобетонные опускные колодцы. В редких случаях могут быть использованы кессоны. Облицовка шахт делается в виде стальных или железобетонных колец путем заготовления этих колец на поверхности и опускания их при проходке под нож кессона. Способы проходки шахт меняются в зависимости от характера проходимых пород. При прочных породах обуривание и взрывы забоя выполняются так же. как и в туннеле.

При проходке большинства туннелей наблюдается значительная фильтрация, борьба с которой ведется двумя методами. Одним из методов является цементация под давлением, которая отжимает воду. При другом методе устраивается система небольших дренажей или коллекторных труб, собирающих воду из стенок туннеля. Дренажные системы обычно очень эффективны и могут обеспечить проходку практически в сухом грунте.

Важное значение для[1] нормальной проходки, в особенности при длинных туннелях, имеет организация вентиляции для отвода газов и буровой пыли и постоянного снабжения туннеля свежим воздухом. Вентиляционная установка обычно подает свежий воздух извне по легким стальным трубам диаметром 30 — 90 *см.* ‘Наиболее эффективно осуществляется вентиляция, когда вентиляционный трубопровод не доведен примерно на 30 *м* до забоя. Вентиляционные трубы прокладываются обычно по стенкам или потолку выработки, с тем чтобы не мешать рабочим операциям, но непосредственно перед взрывом не менее чем 150 *м* вентиляционных труб должно лежать на подошве туннеля. В некоторых случаях для облегчения борьбы с пылью в комбинации с вентиляцией используется мокрое бурение.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

МАШИННЫЕ ЗДАНИЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И ИХ ОБОРУДОВАНИЕ [1]

25. ОБЩАЯ КОМПОНОВКА

Машинные здания предназначены для размещения в них гидравлического и электрического оборудования гидроэлектростанций. Машинное здание разделяется на две части:

а) подводную, служащую для восприятия усилий от оборудования и передачи их на основание, а также для размещения водоводов;

.б) верхнее строение или собственно' здание, защищающее размещенное оборудование от воздействия окружающей среды.

Подводная часть машинного здания может являться частью плотины или водоприемника. В низконапорных ГЭС с напором порядка 15 *м* и ниже машинное здание с его водоприемными устройствами воспринимает напор воды и тем самым выполняет функции плотины.

В современной практике агрегаты ГЭС, обычно располагаются в один ряд нормально к направлению течения воды через здание ГЭС. Такое расположение не только устраняет усложненную схему водоводов, но и упрощает обслуживание оборудования подъемным краном. Подводная часть здания разделена на серию блоков, по одному на каждый агрегат и блоки монтажной площадки. В зависимости от мощности агрегатов один блок может включать два агрегата.

Проходы между отдельными элементами оборудования должны быть достаточно широкими. Должен быть предусмотрен ничем не загроможденный проход шириной не менее 2,5 *м* от одного конца здания к другому. Во многих проектах минимальное расстояние между оборудованием вне основного прохода принято 1,2—1,5 ж. Исключение делается для редко используемых проходов.

На крупных ГЭС, требующих как оперативного, так и ремонтного персонала, пульт управления может быть расположен в любом удобном месте. Очень часто его размещают в отдельном изолированном помещении, удаленном от основного оборудования. На малых ГЭС, на которых для обслуживания и управления требуются только 1 или 2 чел., пульт управления, как правило, располагается как можно ближе к генераторам и центру эксплуатационной деятельности ГЭС. Для оперативного управления имеется несомненное преимущество такого расположения, поскольку кабельный туннель располагается непосредственно под комнатой управления.

Регуляторы, насосы, возбудители, вентиляторы и все другое вспомогательное оборудование, требующее надзора со стороны эксплуатационного персонала, должны быть установлены таким образом, чтобы расстояние от них до пульта управления было возможно более коротким.

Монтажная площадка располагается обычно в одном конце здания и должна быть таких размеров, которые обеспечили бы разгрузку оборудования и его ремонт. Размер площадки зависит от габаритов оборудования и обычно определяется размерами генератора. Монтажная площадка должна обеспечивать возможность заезда на нее грузовиков, трейлеров или железнодорожных платформ с достаточным запасом для разгрузки оборудования. Если проект предусматривает ввод железнодорожной колеи на монтажную площадку, то целесообразна установка третьего рельса для движения трансформаторной тележки. Целесообразно в отдельных случаях устраивать монтажную площадку с площадью, равной полуторной площади блока. Во время монтажа агрегатов это помещение обычно до предела заполнено различным оборудованием, находящимся там до момента монтажа. В случае аварийного

[1] В гл. 10 'перевода вошли основное содержание гл. 36 и 37 оригинала, д также некоторые разделы из гл. 38, относящиеся к конструкциям спиральных камер и отсасывающих труб.

повреждения агрегата на монтажной площадке может быть проведено быстрое его восстановление.

Если подъездные пути располагаются выше уровня пола генераторного зала, то пол монтажной площадки может быть соответственно* приподнят над полом машинного зала, и оборудование будет опускаться на пол зала монтажным краном. Во многих случаях это требует подъема рельсов крана, что увеличивает высоту здания. Поэтому, где только возможно, желательно иметь монтажную площадку на одном уровне с полом генераторного зала.

При проектировании монтажной площадки следует тщательно продумать размещение каждого элемента оборудования, с тем чтобы доступ к ним обслуживающего персонала и крана был удобным.

Раньше главные трансформаторы располагались в отдалении от машинного зала. Современная практика проектирования предусматривает расположение их снаружи или внутри машинного здания, в непосредственной близости от генераторов, с тем чтобы уменьшить длину кабеля.

Выемка сердечника трансформатора, которая бывает иногда необходима при производстве ремонта или ревизии, требует значительной высоты крана, которая бывает ненужна для другого оборудования. Обычно трансформаторы монтируются на собственных катках. 'Вблизи может находиться специальная тележка для их перевозки; с помощью катков или тележки они могут быть подвезены к основному или вспомогательному крюку машинного зала, который в состоянии поднять их целиком и опустить в проем, имеющийся на монтажной площадке, на какую-либо низкую отметку, достаточную для извлечения сердечника. Место выема сердечника должно быть полностью защищено от атмосферных влияний, кроме того, должны быть обеспечены сток масла и свободный подход к сердечнику для его осмотра и ремонта.

На многих крупных ГЭС устанавливаются один или несколько небольших агрегатов собственных нужд, состоящих из турбин и генераторов постоянного тока; они служат для того,, чтобы основные гидрогенераторы ГЭС могли быть включены в работу без подвода энергии извне. Это „требует дополнительной строительной кубатуры в верхнем строении или подводной части машинного здания. В современных ГЭС возбудитель монтируется непосредственно на генераторе с использованием находящегося поблизости мотор-генератора., Для обслуживания в аварийных случаях вспомогательных устройств, затворов, освещения,, насосов и т. п. на некоторых ГЭС монтируются двигатели внутреннего сгорания с машинами постоянного тока.

26. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПОДВОДНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ

Машинные здания выполняются обычно из бетона или железобетона. Конструкция подводного строения зависит от типа спиральной камеры — бетонной или металлической: Размеры спиральных камер определяются типом турбины, но проектировщик может вносить в них изменения в соответствии с требованиями проекта.

Бетонные спиральные камеры применимы для мощностей агрегатов до 80 тыс. *кет* при напорах- 6—27,5 *м.* Однако использование этого типа спиралей для больших мощностей и напоров связано с рядом трудностей в выполнении элементов камеры из железобетона. Нормальная средняя скорость течения в бетонной спиральной камере не должна превосходить. 14% максимально возможной теоретической скорости свободного истечения *v=^2gH.* При тщательном оформлении контура водоприемника и спирали скорости могут быть несколько повышены без. заметного увеличения потерь напора. Превышение скоростей в спиральной камере на 60% над нормальными в одном проекте уменьшение к. п. д. турбины на 1 /о- Такое увеличение скорости, не следует допускать без тщательного' анализа. Создание поворотнолопастных турбин большой быстроходности значительно, увеличило число установок,. ДЛЯ. кото-

рых этот тип турбин оказался целесообразным.

Увеличение расходов воды на агрегат вызвало существенное увеличение размеров водоводов и усложнило конструкцию подводной части. Как видно из приводимых рис. 109—112, потребовалось включение в конструкцию ряда дополнительных устройств: промежуточных бычков, направляющих элементов, вспомогательных затворов и т. п. При проектировании входных элементов спиральной камеры должно быть обращено особое внимание на обтекаемость всех элементов.

В этих конструкциях все вертикальные усилия от агрегата воспринимаются опорным кольцом турбины, расположенным на бетоне вокруг отсасывающей трубы.

Бетонная спиральная камера представляет собой напорный ВОДОВОД, И: потому должна быть предусмотрена значительная армировка верхней части камеры для восприятия вертикального давления. При определении давления в спиральной камере должен быть учтен гидравлический удар. Все элементы стенок спиральной камеры должны быть тщательно связаны с конструкцией подводной части. Для

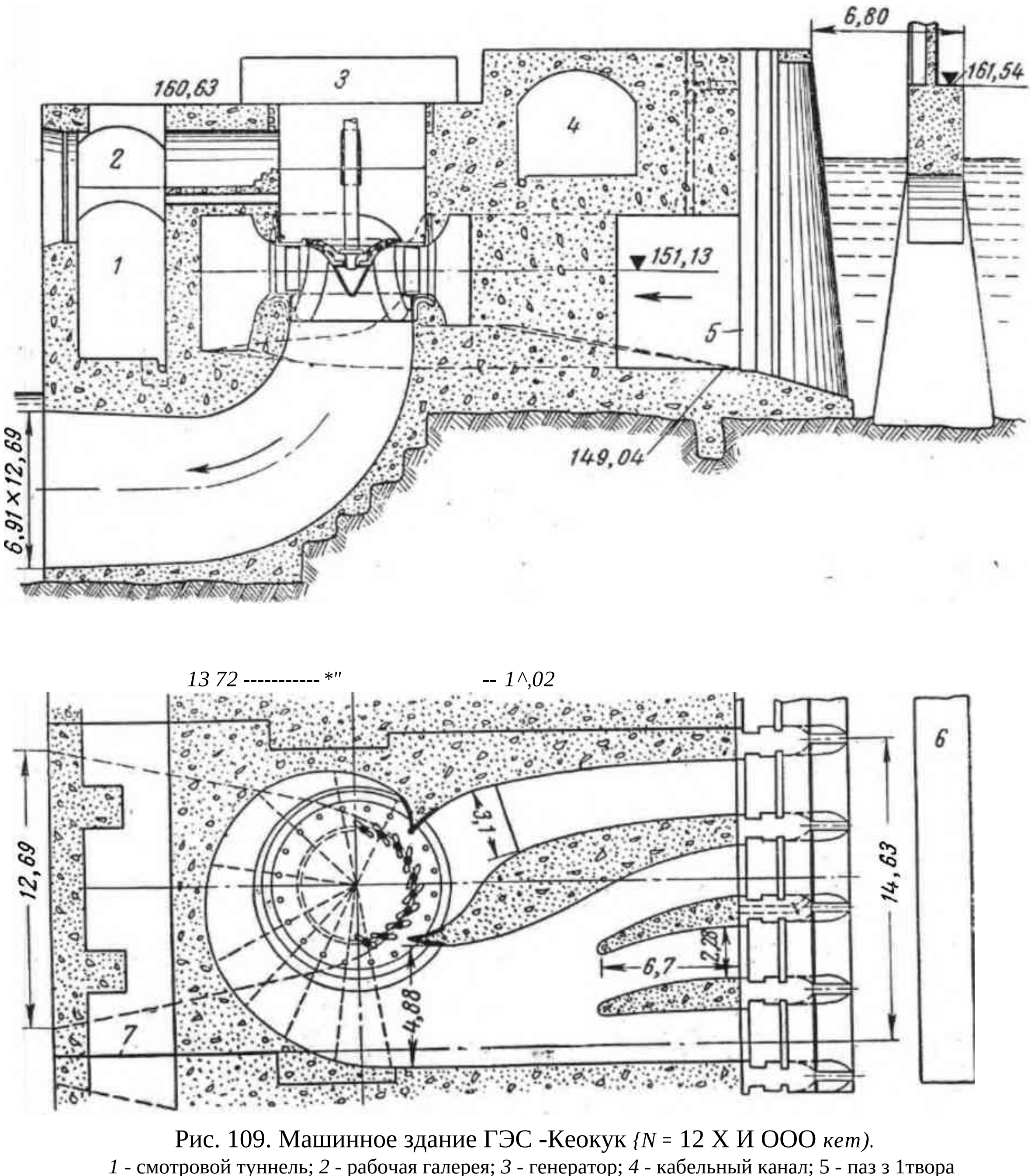


Рис. 109. Машинное здание ГЭС -Кеокук {N = 12 X И ООО кет).
1 - смотровой туннель; *2* - рабочая галерея; *3* - генератор; *4* - кабельный канал; 5 - паз з 1твора *6* — арка аванкамеры; *7* — шов.

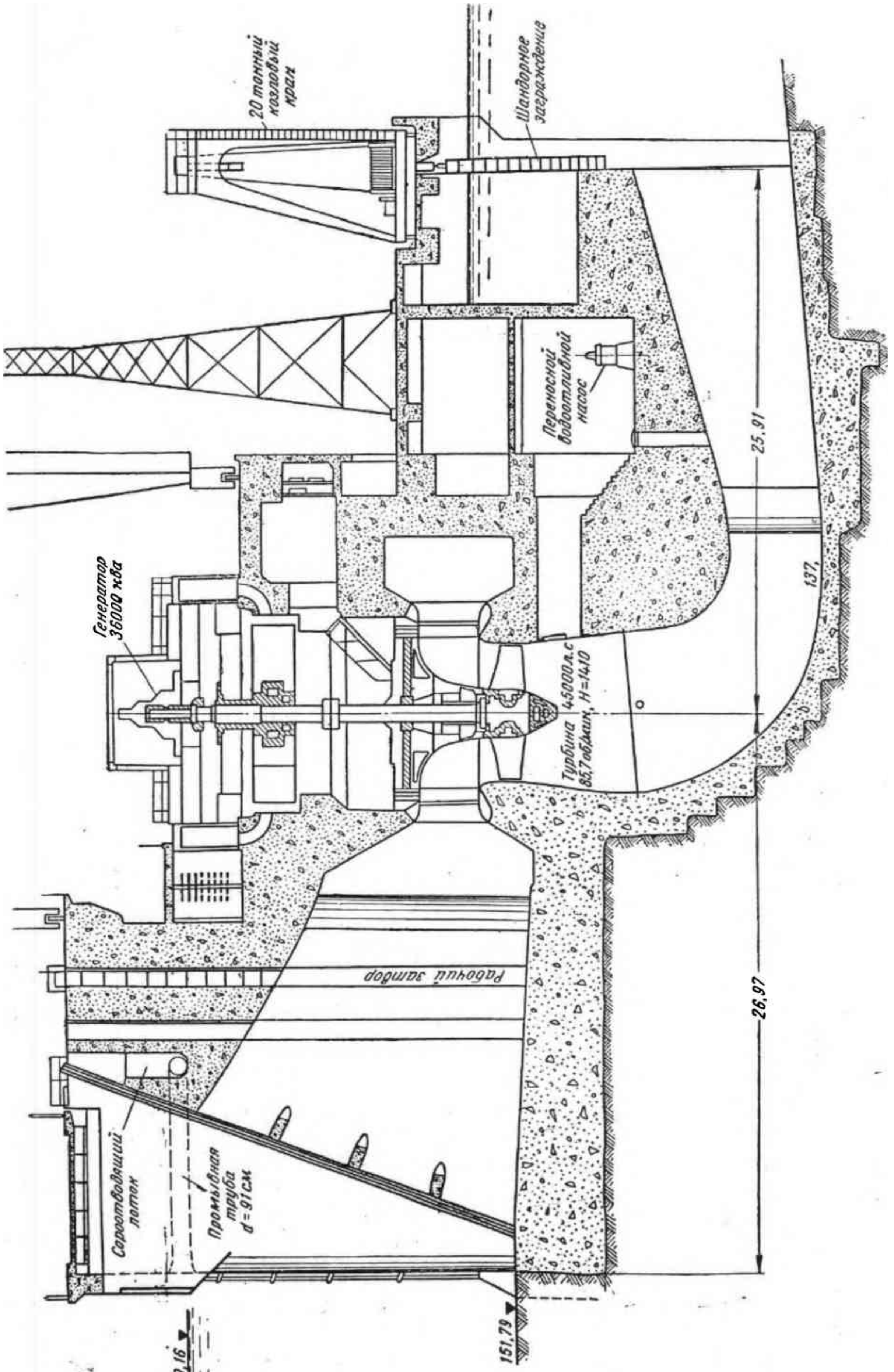


Рис. 110. Машинное здание ГЭС Уилер.

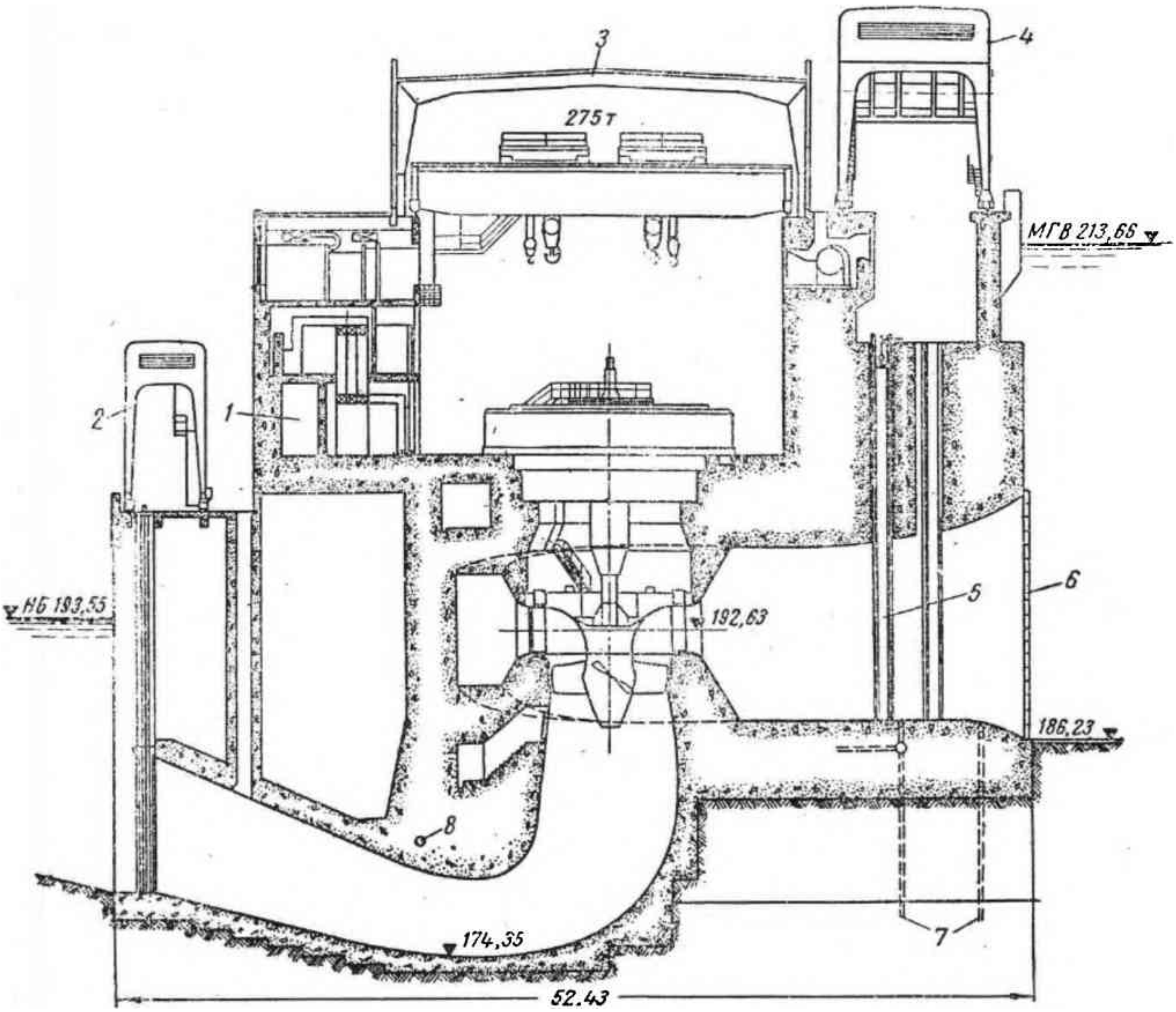


Рис. 111. Машинное здание ГЭС Чикамауга.

1 — кабельный туннель; *2* — кран 20 *т; 3* — сборное перекрытие; *4* — кран 80 *т\ 5* — рабочий затвор; *6* — решетки; 7—цементационные скважины высокого давления; *8*— дренажные трубы.

широких спиральных камер могут быть использованы промежуточные бычки для уменьшения пролетов перекрытия. На рис. 109 обращает на себя внимание очертание промежуточных бычков, обеспечивающее хорошую гидравлику хода. На рис. 110 представлен разрез по установке Уилер. На рис. 111 дан разрез по зданию ГЭС Чикамауга, а на рис. 112— план ©того же ’здания.

С точки зрения к. п. д. турбин поступление воды в подводную часть здания должно осуществляться с малыми скоростями с 'постепенным увеличением их к рабочему колесу турбины и затем последующим уменьшением к нижнему бьефу. На рис. 113 показано поперечное сечение агрегата ГЭС Бонневиль, а на рис. 114 —план фактически выполненной спиральной камеры. Модельные исследования показали, что более простые очертания спиральной камеры лучше принятых на ГЭС Бонневиль. Нужно отметить, что многочисленность промежуточных бычков и направляющих стенок, целью которых было уменьшение водоворотов, увеличило потерю напора на трение на большую величину, чем был достигнут выигрыш в напоре за счет уменьшения водоворотных зон. На рис. 115 дано сравнение опытов на модели рабочего колеса турбины спиральной камеры ГЭС Бонневиль диаметром 400 *мм.* Эти исследования, проведенные для условий, соответствующих напорам 15,2—18,3 *м,* показали, что простые очертания спираль-

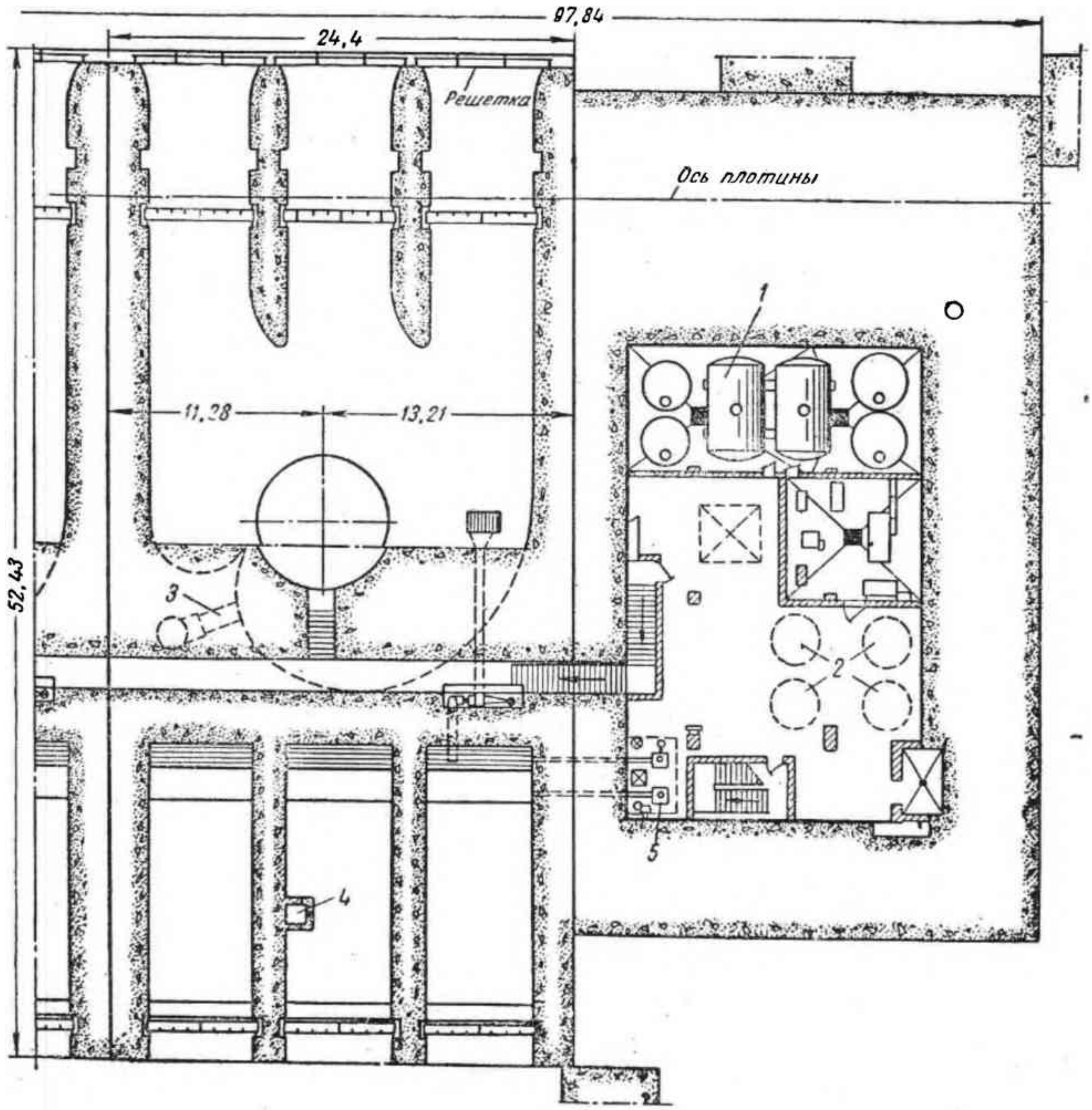


Рис. 112. План машинного здания ГЭС Чикамауга.

1 масляное хозяйство, 2 ресиверы для отжатия воды из отсасывающей трубы; *3* — вход в спиральную камеру *4* — вход в отсасывающую трубу; 5 — насосы для водоотлива.

ной камеры выгоднее принятых на ГЭС Бонневиль.

Как правило, сложные конструкции входа вызывают удорожание сооружения, поэтому наиболее желательным является оформление входа по схеме на рис. 112.

Металлические спиральные камеры применимы для любой мощности и любых напоров свыше 12—15 *м.* Даже при низких напорах спиральные камеры из металла могут конкурировать с бетонными вследствие сложности железобетонных конструкций для низконапорных ГЭС.

Средняя скорость в металлических спиральных камерах не должна превышать 16% теоретической скорости истечения ($v = \sqrt{2gH}$) и во всяком случае не должна быть больше 6 *м/сек.* В металлических турбинных камерах можно допускать несколько повышенные скорости, примерно до 20% теоретической скорости свободного истечения. Металлическая спиральная камер.а рассчитывается на полное

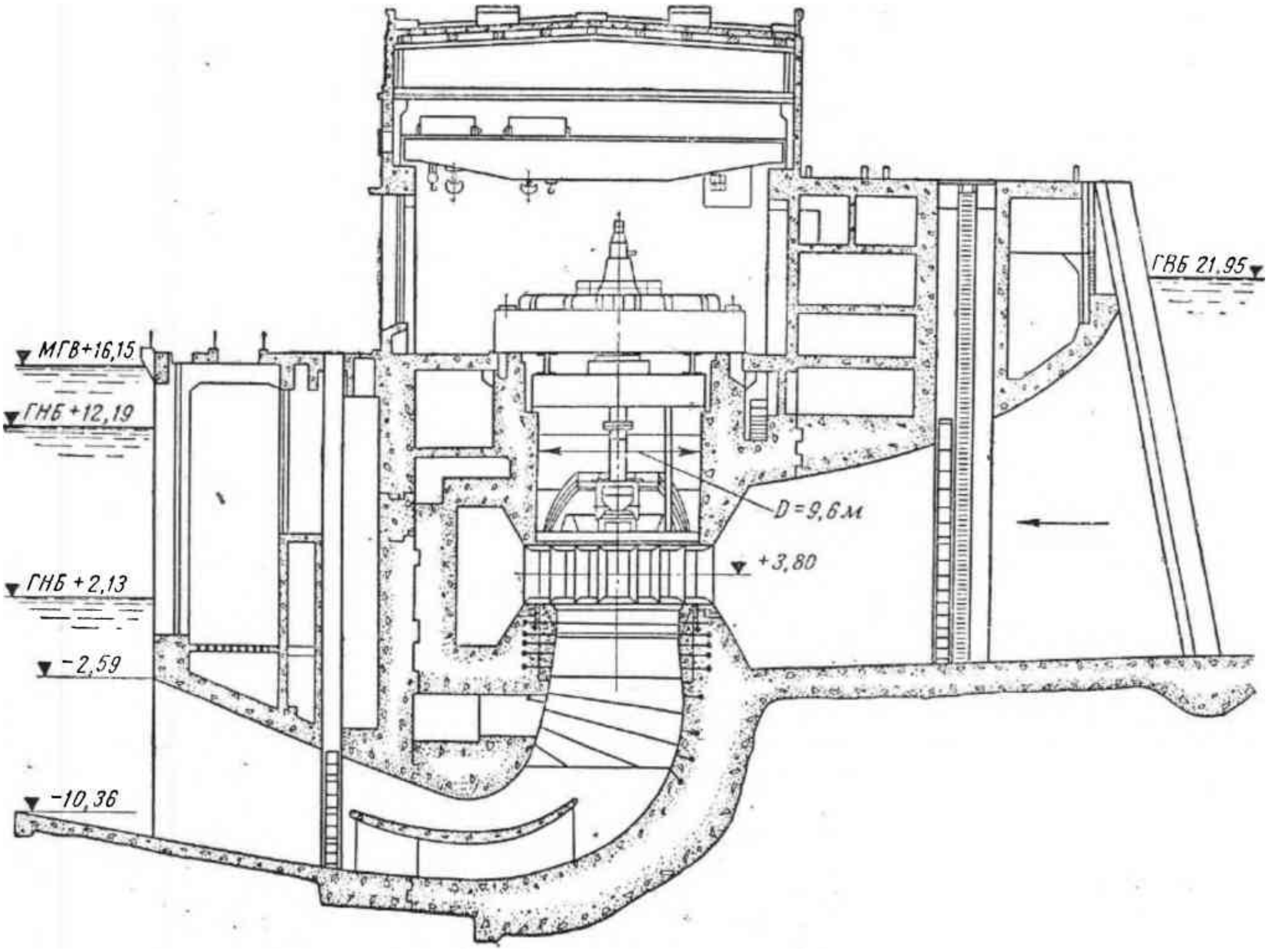


Рис. 113. Машинное здание ГЭС Бонневиль.

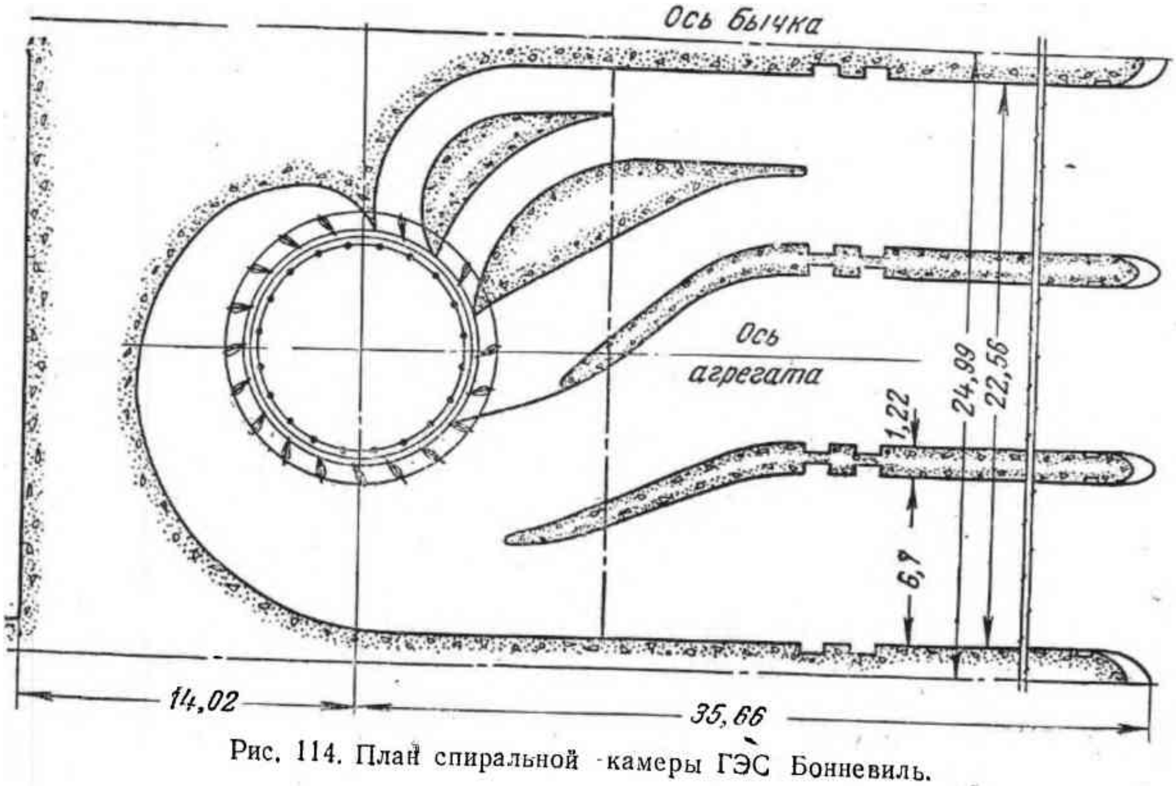


Рис. 114. План спиральной камеры ГЭС Бонневиль.

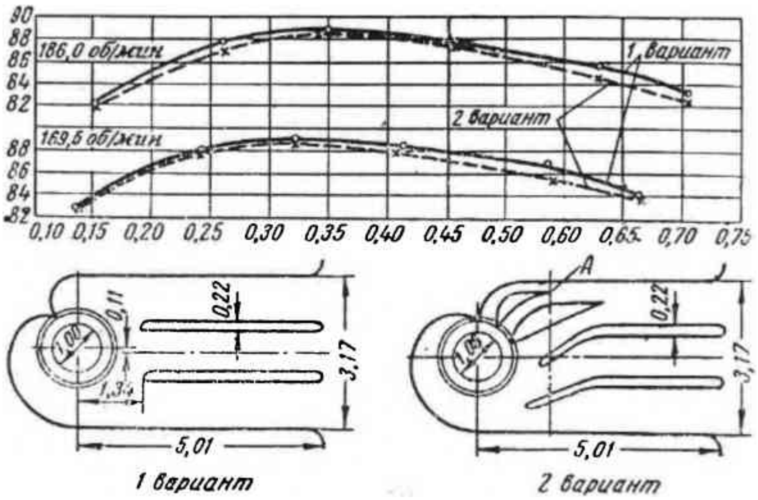
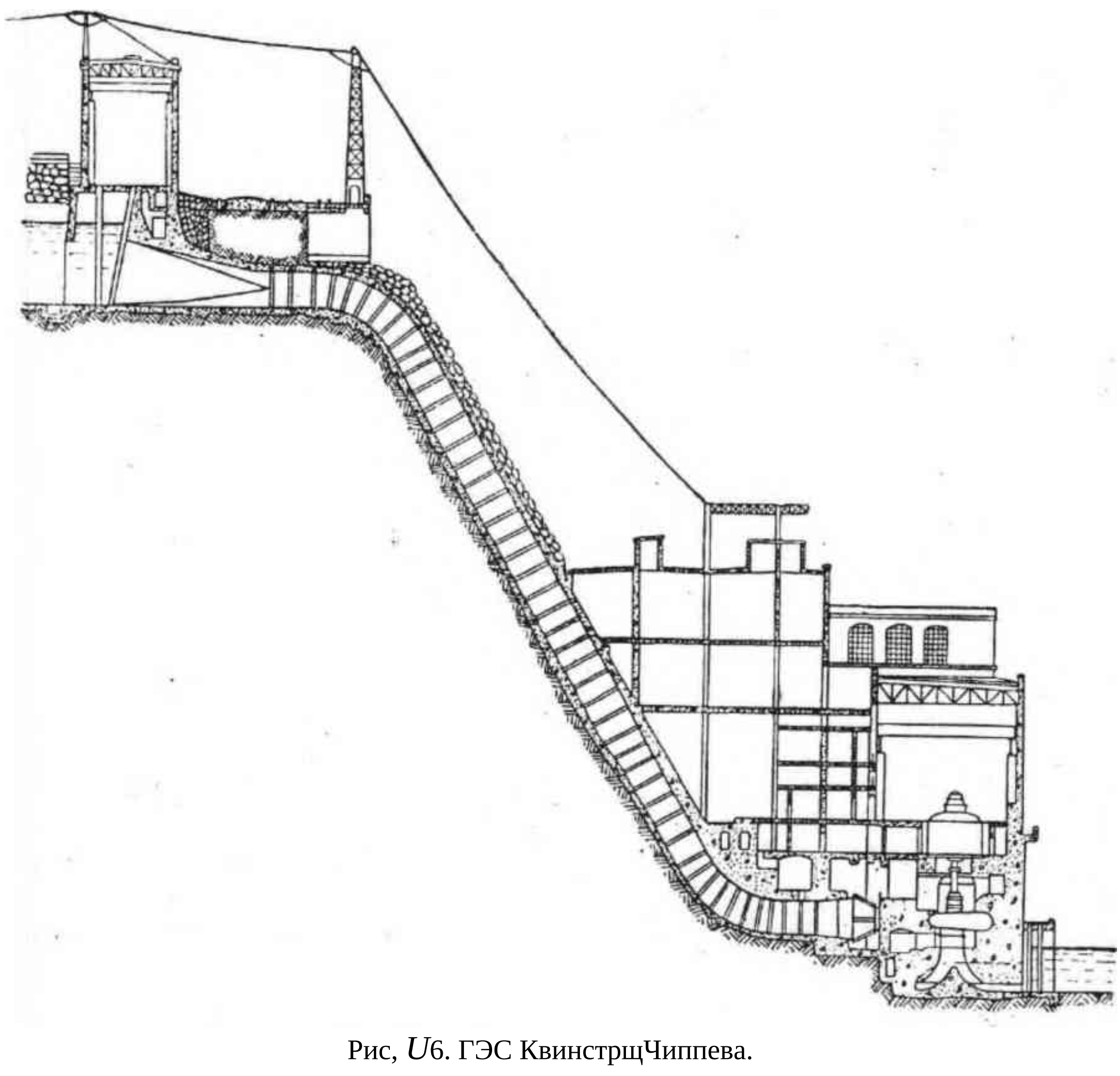


Рис. 115. Сравнение модельных испытаний спиральной камеры ГЭС Бонневиль (по абсциссе— мощность на модели в *л. с.;* по ординате — к. п. д.).

внутреннее давление без учета разгружающего действия бетона; полученная в результате расчета толщина стенок камеры обычно увеличивается не менее чем на 3 *мм* для учета истирания стенок камеры наносами.

На рис. 116 и 117 показаны характерные схемы машинных зданий с радиально-осевыми турбинами.

Пространство перед турбинами, под полом генераторного ’ зала, как показано на рис. 111 и 113, занято галереей, идущей вдоль всего здания. В этой галерее обычно располагаются все трубопроводы, предназначенные для управления агрегатами: маслопроводы, воздухопроводы и т. п. В ряде случаев эта галерея используется



Рис, *U*6. ГЭС КвинстрщЧиппева.

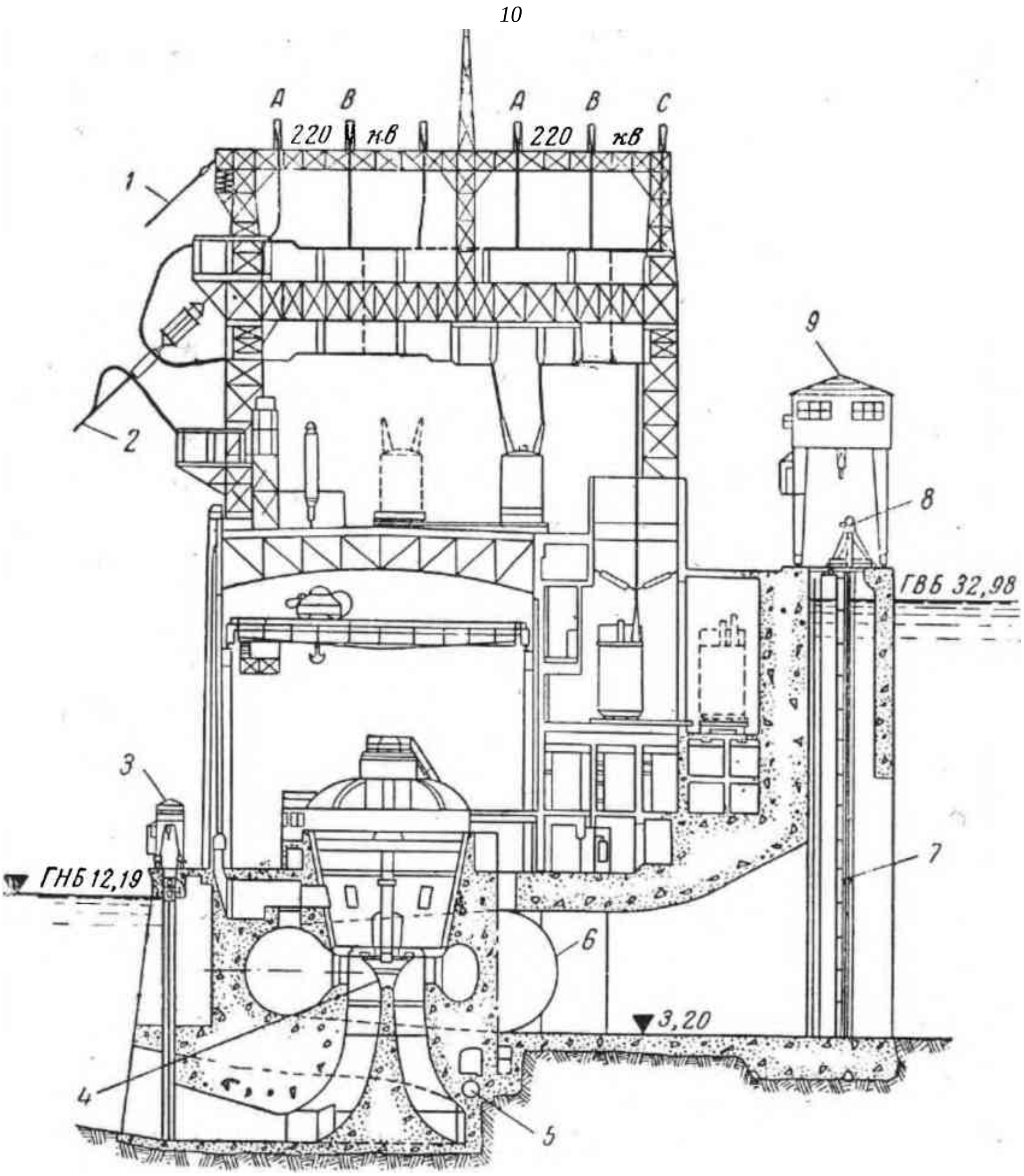


Рис. 117. Машинное здание ГЭС Коновинго.

/ — заземление; *2* — фидер; 5 —кран; *4* — рабочее колесо; 5 — дренажная труба; *6* — дисковый затвор; *7* — решетка; *8* — подъемник для решетки; *9* — кран для подъема затворов; *10* — громоотвод.

для расположения в ней кабелей, хотя обычно предпочитают кабельную галерею делать самостоятельной с прокладкой кабеля в специальных каналах под съемным полом, обеспечивающим удобство ремонта и надзора.

Области применения различных типов спиральных камер зависят о г местных условий и размеров агрегатов. На рис. 118 даны приближенные пределы напора и мощности для каждого типа. На рис. 119 показаны допустимые скорости при полной мощности для спиральных камер различных типов. Более высокие скорости создают неустойчивую работу агрегата.

Приближенное определение размеров спиральной камеры в зависимости от расчетного напора диаметра рабочего колеса и коэффициента быстроходности показано на рис. 1,20 и 121 для радиально-осевой и пропеллерной турбин. Более точные расчеты выполняются заводами-поставщиками.

В размерах спиральной камеры для поворотнолопастной и пропеллерной турбин при одинаковом их диаметре имеется небольшая разница. Эта разница обусловлена тем, что поворотно’лопастная турбина при полной

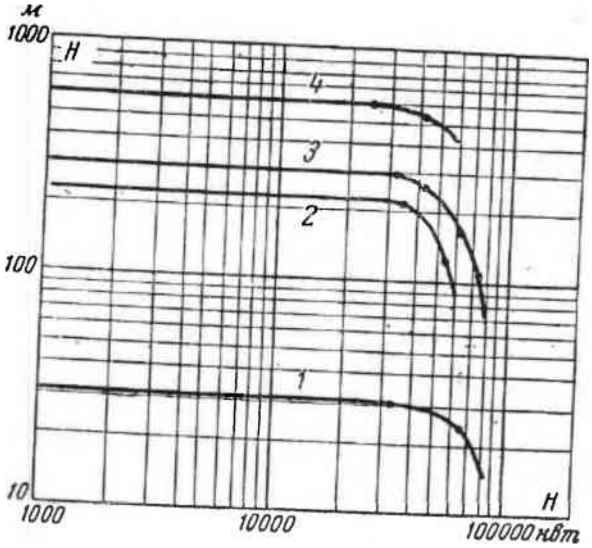
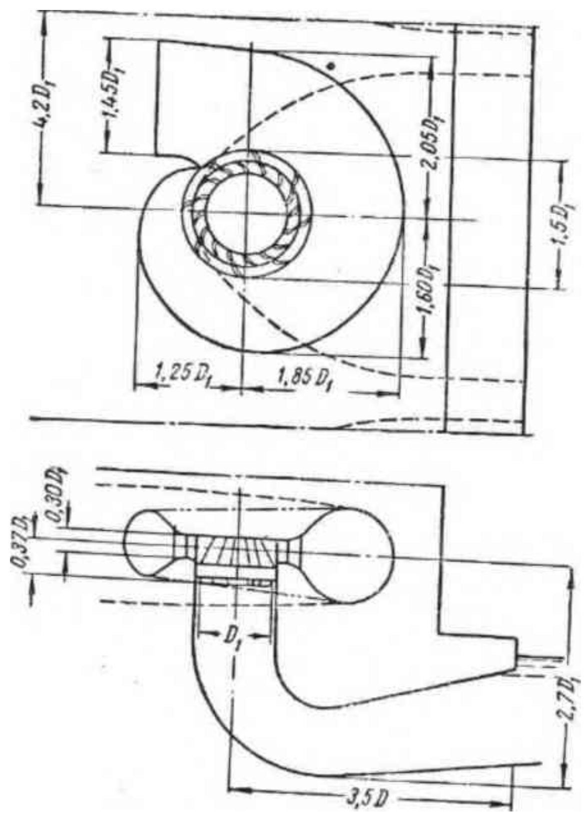


Рис. 118. Диаграмма мощностей и напооов для разных типов турбинных камер.

/ — бетонные; *2* — стальные клепаные; *з* — стальные сварные; *4*— струйно-ковшовые.

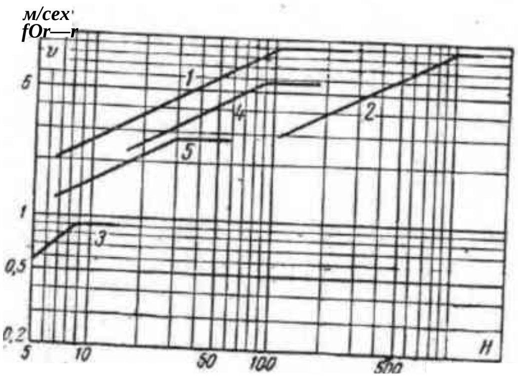


Рис' 2?°' приблизительные установочные р змеры радиально-осевых турбин.

нагрузке пропускает расход воды *приблизительно* на 12% больший, чем млпич ерН-аЯ' ПопеРечное сечение ме- ^ллической спиральной камеры бывает обычно круглым, а бетонной— чаще всего трапецеидальным с округленными углами.

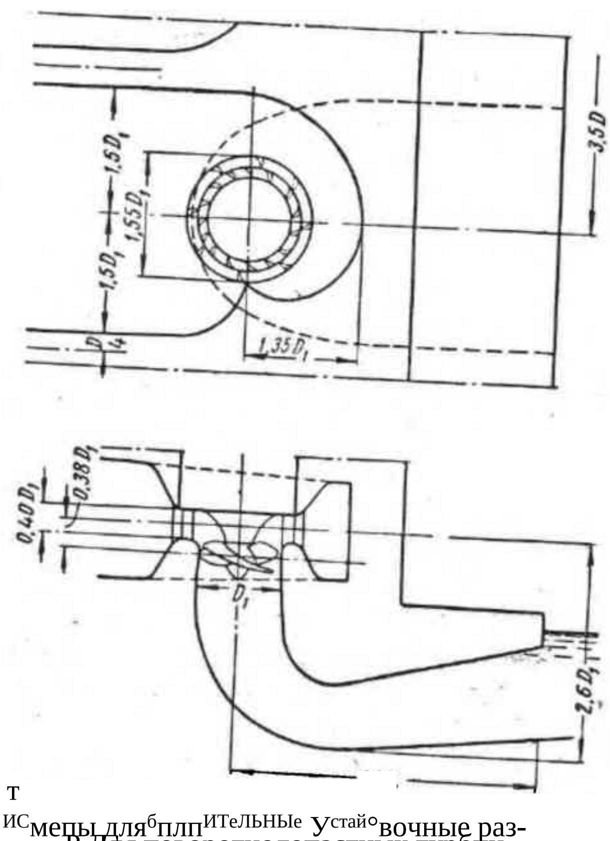
Отсасывающие трубы как элемент значительной мере определяющий • . Д. агрегатов, проектируются и собой"пЫВаЮТСЯ заводом> представляя рудованияУ ИЗ ЧЭСТей Т^бинного обо- отсяВТМп,ТМеННЫХ машиниых зданиях сасывающие трубы применяются ныеЛи^Ь1Х ТИП0В' наиболее характер- но из которых приведены на рис. 122.

]\ак, правило, выход из отсасывающей трубы находится ниже русла реки поэтому сопряжение наинизшей точки с отметкой русла выполняется в виде



в

ЧУГУНЯЫ%



р т

ИСмепы дляблпп ИТеЛЬНЫе Устайоовочные размеры для поворотнолопастных турбин.

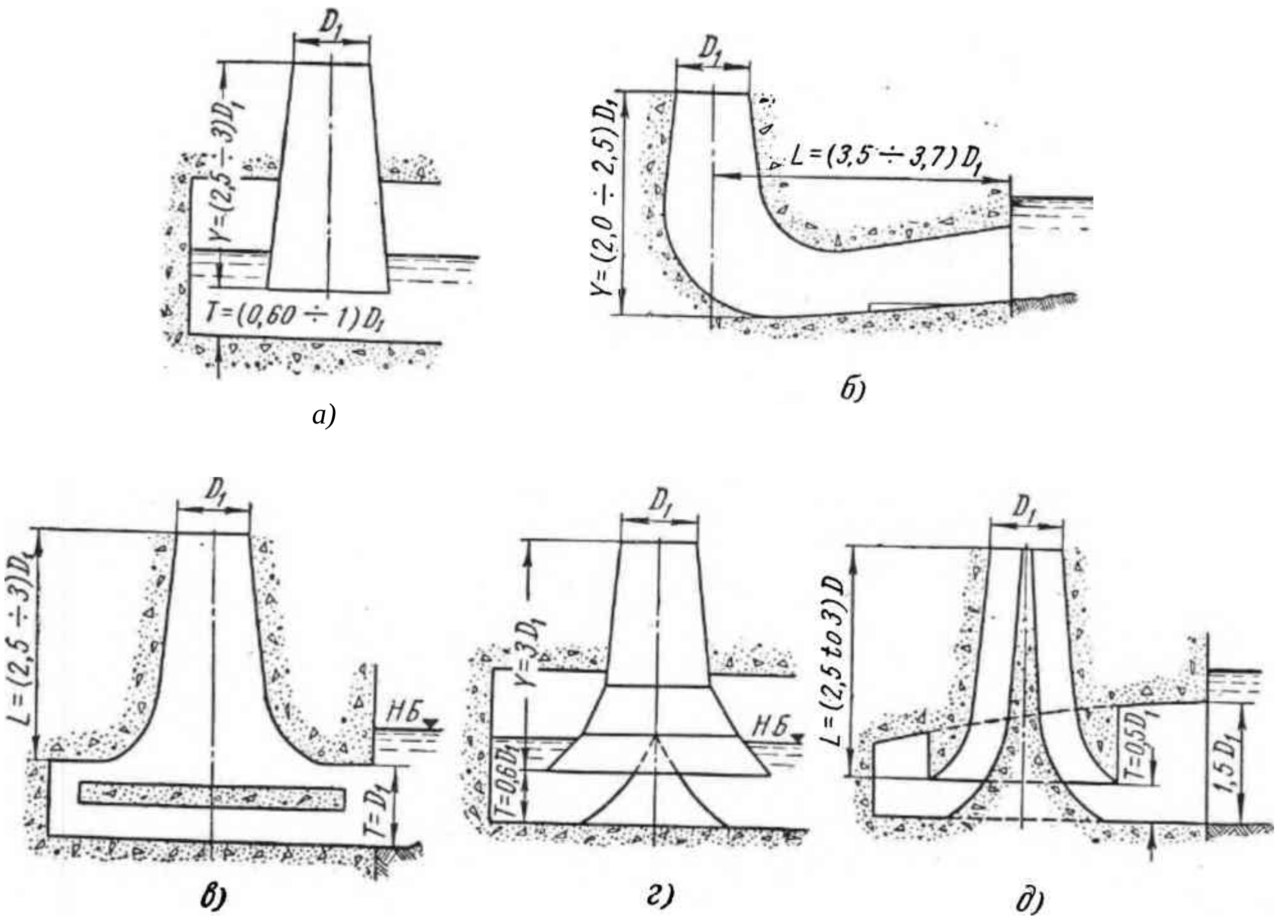


Рис. 122. Типичные конструкции отсасывающих труб
а - прямэосная; *б* - коленчатая; гидрокэн; *г* - низкая коноидальная; d _ высо’кая коноидальная.

пологого раструба с различными наклонами дна. Наклон дна ковша обычно рекомендуется принимать в пределах 1 : 6—1 *:4*, но не круче; при больших уклонах отмечено снижение к. п. д. турбины. Наиболее употребительными типами труб являются прямоосная и коленчатая отсасывающие трубы. Угол раструбности не превышает 7°.

Коленчатая труба дает экономное решение, поскольку она позволяет уменьшить глубину выемки. Ее длина составляет 2,5—3,7 диаметра рабочего колеса турбины.

Спиральные камеры расположены обычно над уровнем нижнего бьефа и могут опорожняться специальными отводящими трубами. На малых ГЭС никаких устройств для принудительного опорожнения не требуется. Для больших ГЭС должны быть предусмотрены приспособления для полного опорожнения отсасывающих труб. Существует ряд приемов опорожнения. В одном случае от общего трубопровода, присоединенного к насосу, делаются отводы к каждой отсасывающей трубе. В других случаях ставится индивидуальный насос на каждый агрегат. Для отжима воды из отсасывающей трубы и перевода генератора в режим синхронного компенсатора служит компрессор.

Подводная часть машинного здания должна включать в себя коллекторные галереи и дренажные трубы. Из коллекторных галерей вода специальными насосами отводится в нижний бьеф. Для этой цели целесообразно устраивать дублирующие насосы. Как показала практика, некоторые аварии могли бы быть избегнуты при этом простейшем мероприятии.

Для обеспечения опорожнения отсасывающих труб на выходе их должны быть расположены затворы или ремонтные заграждения. Для этой цели устраиваются пазы в бычках и монтируются подъемные устройства такие же, как в верхнем бьефе. Следует учитывать, что рабочие затворы в верхнем бьефе включаются

в работу достаточно часто, в то время как в нижнем бьефе они используются от случая к случаю. Поэтому затворы и заграждения в нижнем бьефе должны проектироваться минимальной стоимости за счет более медленной установки их на место. Для больших отсасывающих труб делается несколько пролетов, перекрываемых заграждениями, которые выполняются или деревянными—для малых пролетов, или металлическими — для больших.

Для предварительного проектирования представляет интерес определение размеров и объемов подводной части здания ГЭС в функции основных параметров агрегатов. Для этой цели определяется объем подводной части здания и 'монтажной площадки -по наружным размерам и умножается на 0,6, что дает примерный объем бетона, потребный для подводной части.

Для более точных расчетов можно использовать график на рис. 123, который построен по данным многочисленных проектов. На графике объем бетона дается в функции величины напора.

Гидравлика нижнего бьефа ГЭС является одним из наименее разработанных вопросов. В то время как затрачиваются большие усилия на получение целесообразных размеров водоприемников, спиральных камер и отсасывающих труб, гидравлика нижнего бьефа решается очень примитивно,

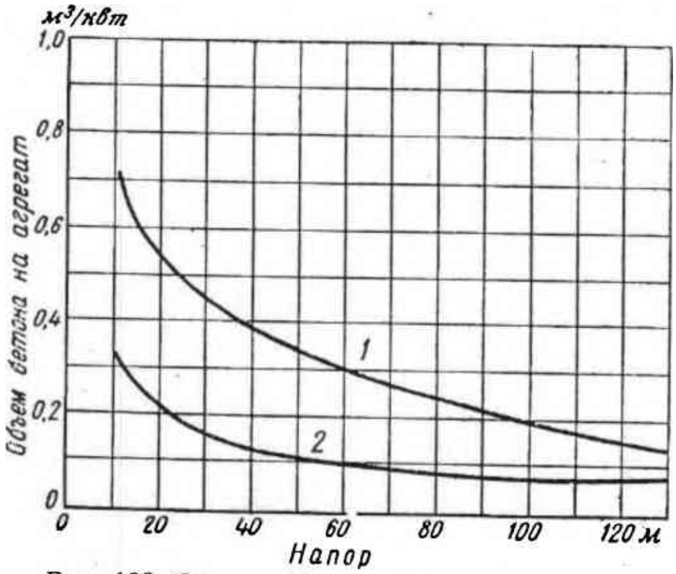


Рис. 123. Объемы бетона для машинных зданий ГЭС.

1 — включая водоприемные устройства; *2* — без водоприемных устройств.

при рассмотрении только характеристики уровней.

Между тем для успешной работы ГЭС требуется тщательный анализ условий отвода воды от гидроэлектростанций. Необходимо подробное изучение режима уровней в нижнем бьефе, режима перекатов и других элементов русла, влияющих на уровни. В отдельных случаях целесообразно проводить модельные исследования. Особенно ответственным является участок, на котором осуществляется сопряжение потока, выходящего из отсасывающих труб, с потоком, проходящим через водосливный фронт. Должны быть исследованы различные режимы уровней нижнего бьефа, с тем чтобы получить представление о возможном выигрыше в напоре за счет лучшей эксплуатации отводящих устройств.

Для различных рек с различными уклонами и насыщенностью наносами могут наблюдаться размывы нижнего бьефа, которые дают понижение уровня, в некоторых случаях ниже предела, допустимого по условиям затопления отсасывающих труб. В отдельных случаях нижний бьеф может аккумулировать наносы, сбрасываемые через плотину, вследствие чего будут уменьшаться уклоны и повышаться уровни нижнего бьефа, что даст уменьшение напора ГЭС. Так как по этому вопросу не могут быть предложены общие решения, проектировать сопряжение здания ГЭС с нижним бьефом приходится в каждом частном случае специально с учетом местных условий.

27. ВЕРХНЕЕ СТРОЕНИЕ МАШИННОГО ЗДАНИЯ

Назначение верхнего строения машинного здания состоит в защите механизмов и оборудования от воздействия на них атмосферных осадков и создании необходимых условий для их эксплуатации. Плановые размеры верхнего строения определяются количеством и габаритами -оборудования, высота же устанавливается в зависимости от размера наибольших деталей, проносимых краном. В верхнем строении должны быть обеспечены свободные пространства для про-

хода персонала, переноса оборудования и монтажа и демонтажа агрегатов. В ряде случаев приходится устраивать дополнительные пристройки к основному корпусу здания для расположения в них пульта управления и других помещений.

Экономичными являются упрощенные типы верхних строений, в которых кровля располагается непосредственно над возбудителями или же над каждым агрегатом устанавливается металлический кожух с размерами, достаточными для прохода обслуживающего персонала. В первом случае кровля делается откатывающейся над каждым агрегатом для возможности его монтажа; во втором случае краном поднимается весь кожух. Все операции выполняются козловым краном, передвигающимся по всей длине здания. При этой схеме пульт управления и вспомогательные помещения располагаются на берегу в конце здания, типичные примеры таких конструкций изображены на рис. 124 и 125.

На установке Кентукки (р. Теннеси, рис. 124) доступ к агрегатам осуществляется через проем, устроенный в перекрытии здания и закрываемый крышкой. Все манипуляции осуществляются 250-тонным козловым краном.

На установке Багнелл (рис. 125) подход к агрегатам осуществляется также через кровлю, кран имеет только одну ногу, а другой его конец дви- ^ СТ5Я „П0 СТСПКе- На выносной консоли расположен подъемник для затворов нижнего бьефа.

На „установке Норвуд (рис. 126) каждый агрегат имеет свой л-------- легко снимаемый кожух, а каждый генератор оборудован индивидуальной циркуля-

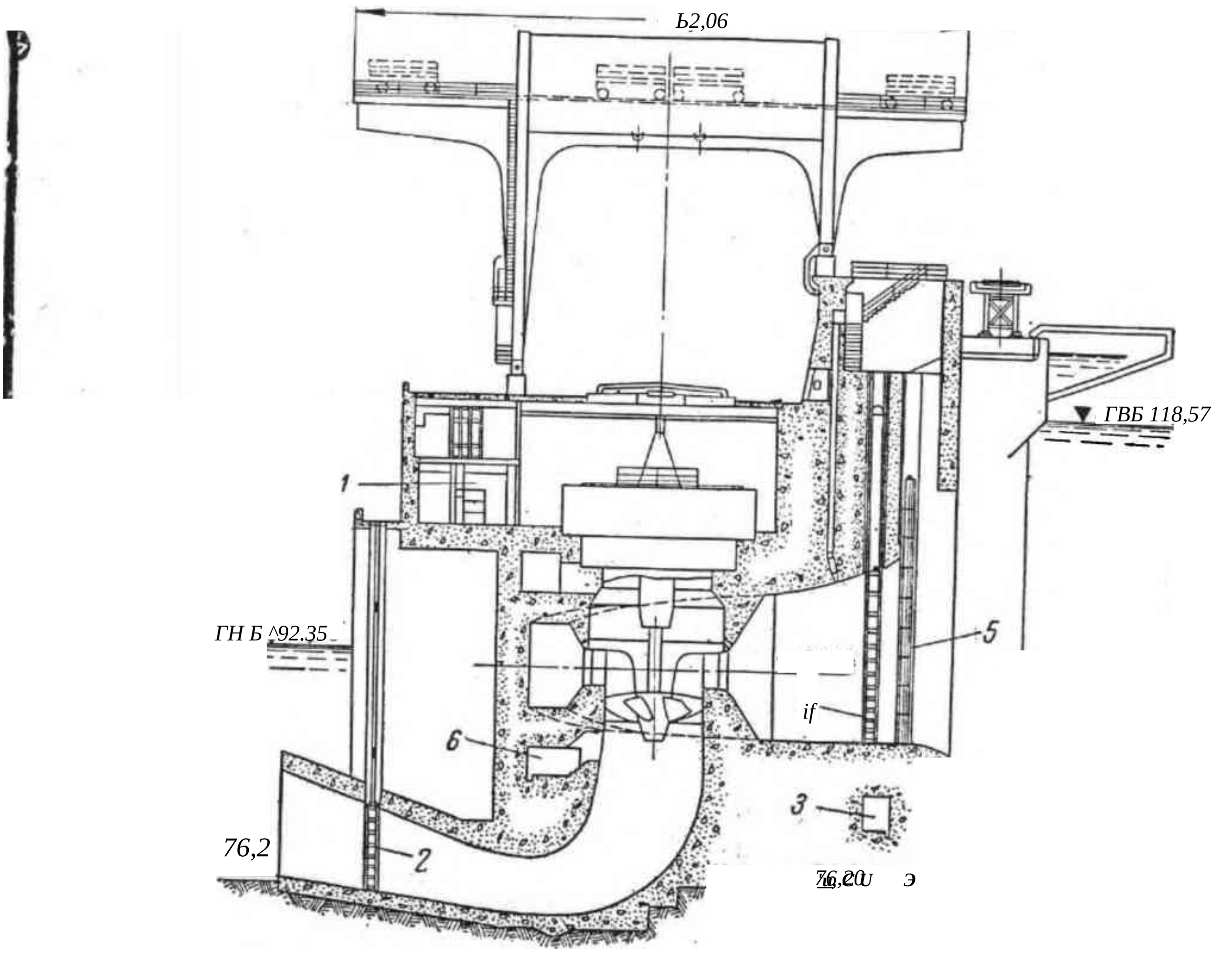


Рис. 124. Машинное здание ГЭС Кентукки
N “ ^4 тыс. *квтг, н* = I4 6 *м*

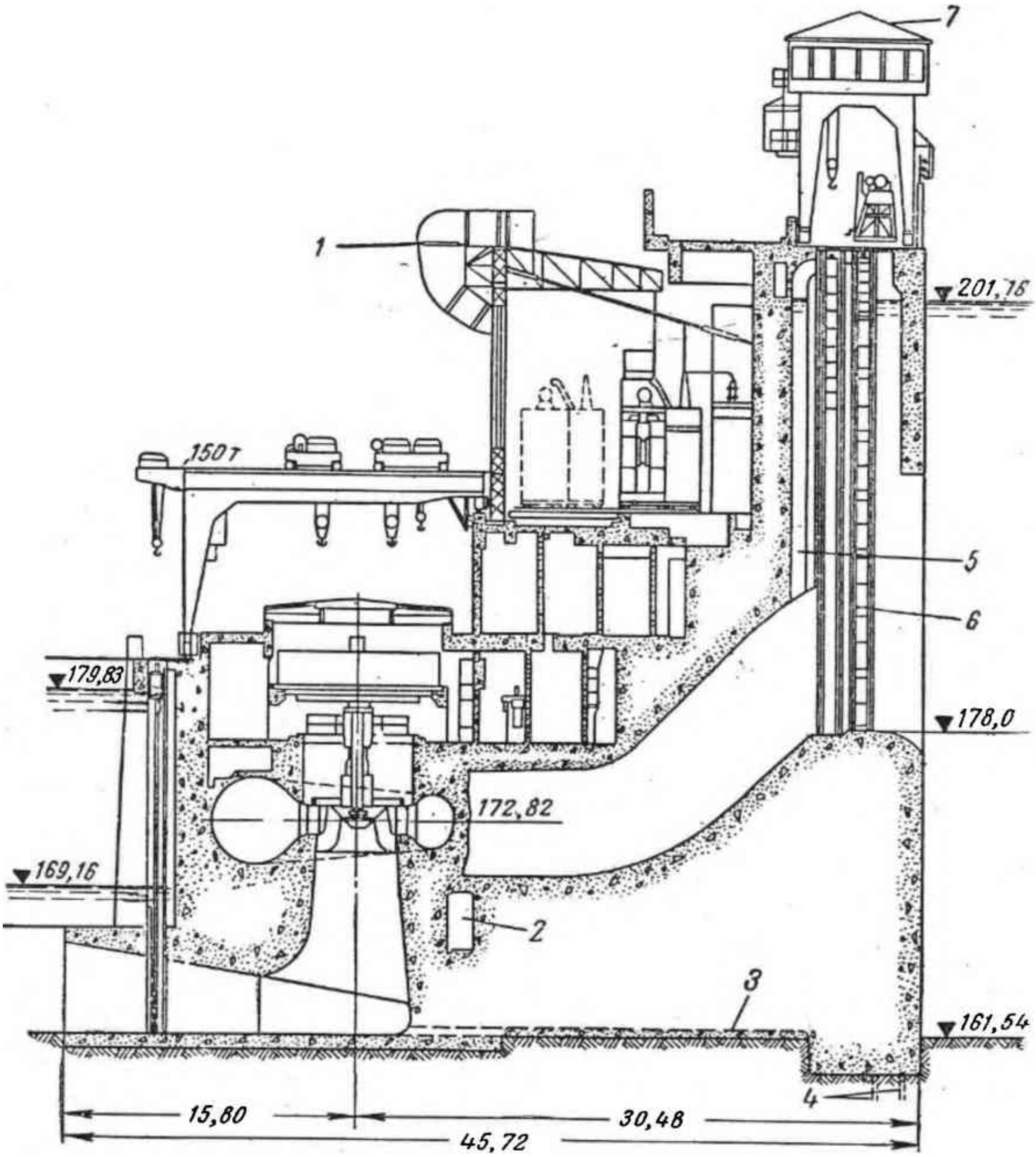


Рис. 125. Машинное здание ГЭС Багнелл.
N = 150 тыс. *кет. H* = 27,4 *м.*
1 — фидер 132 *кв'*, 2 —водоотводной туннель; *3*— дрены; *4* — цементационные скважины; 5 — аэрационная труба; *6* — решетка; 7 — кран 70 *т.*

ционной системой воздушного охлаждения. Кран имеет одну длинную ногу со стороны нижнего бьефа.

Помещения машинных зданий открытого типа достаточны только для осмотра агрегата. Демонтаж основного оборудования осуществляется через кровлю. Имеется один существенный недостаток открытых типов зданий: после того как защитное перекрытие или кожух сняты, все остальные элементы агрегатов подвержены атмосферному влиянию и потому должны перекрываться брезентами или временными чехлами. Поэтому устройство открытых типов зданий ГЭС в северных условиях находится под сомнением. Наибольшая экономия при применении открытого типа достигается для машинных зданий крупных ГЭС. Кроме того, при большом числе агрегатов при выводе одного из них в ремонт нет особой необходимости быстро возвращать к нему кран: агрегат может бездействовать некоторое время. Для малых ГЭС необходимость устройства ряда вспомогательных помещений может вызвать

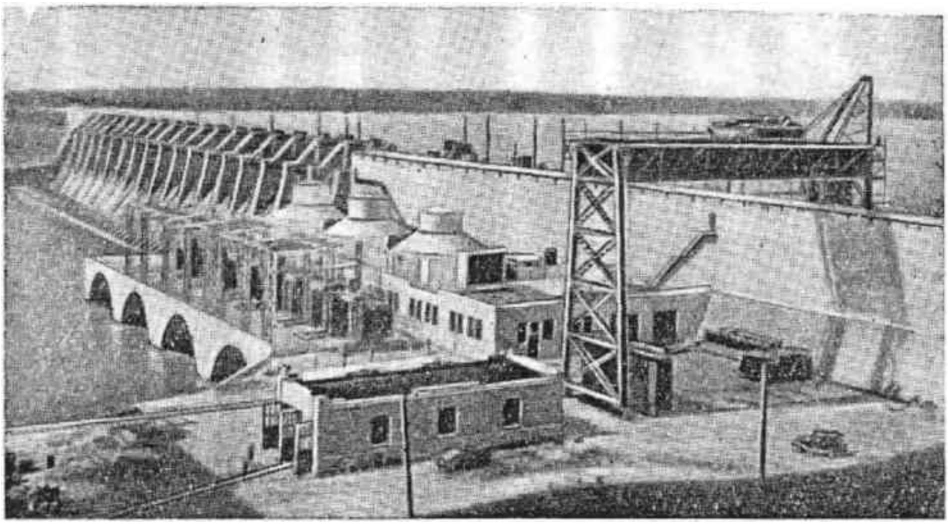


Рис. 126. Открытый тип здания ГЭС Норвуд.
Три агрегата по 22,8 тыс. *кет.*

затраты, большие, чем экономия, полученная от открытого типа.

Закрытый тип маш^йнсго здания предусматривает перекрытие всего оборудования с расположением внутри здания мостового крана. Высоковольтные трансформаторы, как правило, располагаются вне здания. Сравнение открытого и закрытого типов должно быть сделано на основании тщательных подсчетов, однако в большинстве случаев эксплуатационный персонал предпочитает закрытый тип здания, в котором демонтаж и ремонт агрегатов могут проводиться независимо от условий погоды.

■При проектировании машинных зданий необходимо учитывать архитектурную сторону вопроса. Хотя машинное здание представляет собой чисто производственную конструкцию, однако при расположении зданий вблизи дорожных магистралей или культурных центров необходимо обращать внимание на высокое качество архитектурного оформления.

Нет никакой необходимости проектировать дорогостоящие элементы для архитектурного* оформления. Имеется множество примеров эффективно выглядящих конструкций из железобетона, кирпича и других недорогих материалов. Очень привлекательны верхние строения здания, выполненные из обыкновенного кирпича с орнаментировкой из элементов напряженно-армированного бетона (рис. 127).

Внутри здания должно быть обращено внимание на широкое применение окраски, так как это* резко улучшает вид, почти не изменяя стоимости. Весь интерьер машинного здания должен проектироваться с использованием простых и дешевых материалов со строгими линиями и расцветкой. При проектировании машинных зданий необходимо обращать внимание на то, что они должны создавать впечатление прочности и массивности. Легкие, воздушные и фантастические фасады неуместны для машинных зданий.

В качестве несущих элементов зданий должны быть, как правило, использованы железобетонные рамные конструкции. В некоторых случаях для поддержания мостовых кранов возможно устройство массивных стен. Широко используется для верхнего строения зданий железобетон, который дает прекрасное архитектурное решение. Нежелательно устройство больших площадей бетонных стен, которые плохо воспринимаются глазом и на которых очень заметны, трещины и неровности.

Для устройства бетонных стен наиболее целесообразно использование абсорбирующей опалубки, которая дает плотную, хорошо сопротивляющуюся времени бетонную поверхность.

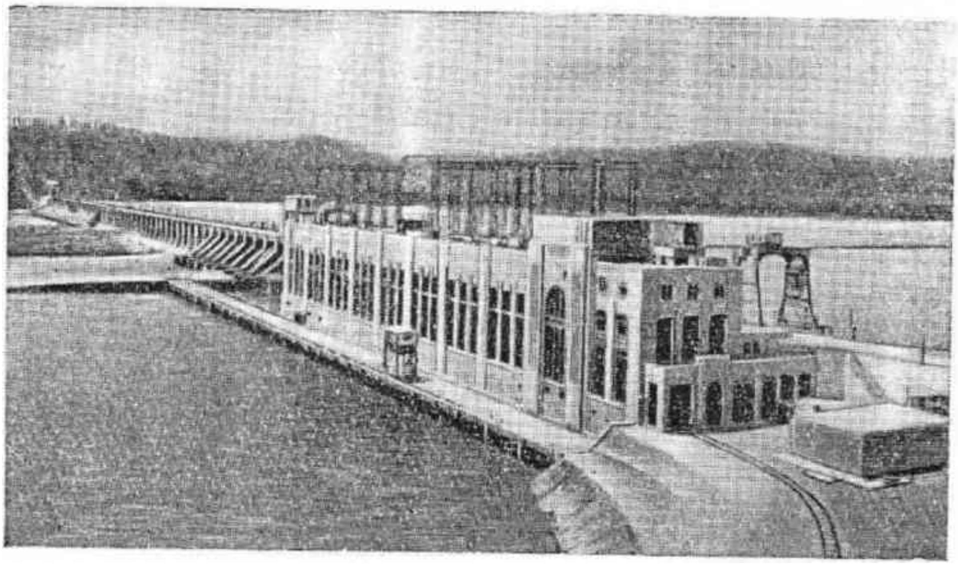


Рис. *127.* Машинное здание ГЭС Сейф Харбор.
■А = 7Х31,4 тыс. *кет.*

Особое внимание должно быть обращено на освещение и вентиляцию машинных зданий. Необходимо обеспечивать постоянный и достаточный приток свежего воздуха в теплую погоду и отвод горячего воздуха от генераторов. Освещение должно быть достаточным, однако чрезмерное количество окон придает излишнюю легкость зданию.

Пол машинного здания должен иметь необходимую прочность, чтобы обеспечивалось восприятие нагрузки от механизмов и машин. Качество полов должно быть высоким, чтобы обеспечить длительность их эксплуатации. В местах, где можно ожидать попадания масла на пол, желательно устройство полов из керамических плиток.

Наибольшее распространение для машинного здания получили плоские кровли в виде железобетонного перекрытия с покрытием из водонепроницаемых асфальтовых материалов. Целесообразная конструкция сопряжения кровли с парапетом дана на рис. 128. Кровля выполняется легкого типа. Желательно использование гипсолитовых или других мягких плит по железобетонным балкам.

Все лестницы должны выполняться из стали или бетона и обязательно снабжаться перилами. При крутизне лестницы свыше 45° необходимы двусторонние перила. Все отверстия в лестничной клетке и площадки как вне, так и внутри здания должны снабжаться ограждениями.

Водоснабжение для охлаждения подшипников и трансформаторов и для общего пользования обычно осуществляется из ближайшего водного источника. Для высоконапорных установок вода забирается из трубопроводов, а для низконапорных—непосредствен-

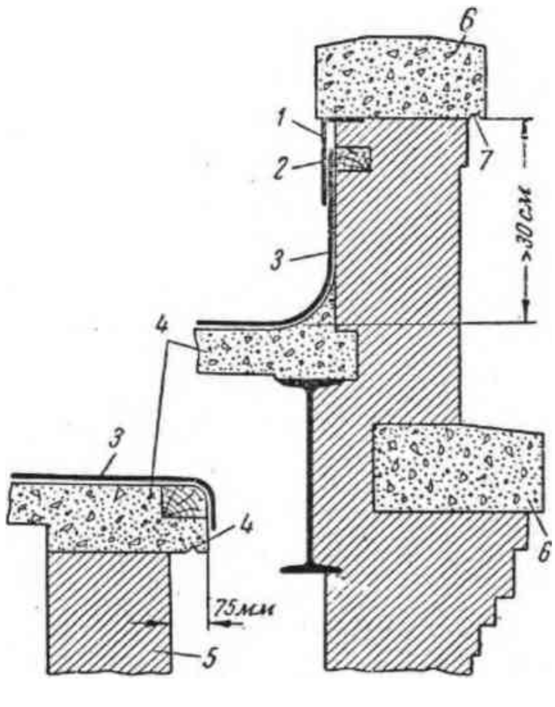


Рис. 128. Детали машинного-здания.
а — оформление карниза; *б* — конструкция парапета.
1 медный лист; *2* — деревянной брус; *3* — гндроизоля-W, 4— бетонная плита; *5* — стенка; *6* — сборные элементы; *7* — слезник.

но ИЗ водоприемников. Для аварийного резерва в техническом водоснабжении целесообразно подключать ГЭС к городской водопроводной сети водоснабжения. Для каждой турбины подвод воды выполняется индивидуально. Водопроводные линии не должны проходить вблизи электрического оборудования. У всех кранов, отводов и вентилей необходимо предусматривать стоки воды.

Крыша и все полы должны снабжаться дренажными трубами, удаленными от электрического оборудо- выводом стоков в верхний и нижнии бьефы.

Наиболее тяжелым оборудованием станции является кран—мостовой или козловый в зависимости от типа здания. Одна из характерных схем расположения оборудования и подъемных устройств крана показана на рис. 126. Количество кранов (один или два) и количество тележек на кране определяются весом и составом оборудования.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ[1]

28. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Успешная эксплуатация гидроэлектростанций во многом зависит от продуманности плана эксплуатации, специально для нее выбранного. ’Этот план должен включать в себя не только организацию эксплуатации, но и основные средства, которыми будет производиться работа, а именно; инструменты, линии связи, испытание оборудования, измерения для составления прогнозов и отчетов.

Первым шагом организации эксплуатации являются подбор и подготовка персонала, который будет фактически работать на станции, поддерживать бесперебойность ее эксплуатации. При разработке плана организации следует иметь в виду, что диспетчерская или оперативная ’ группа является центром энергетической системы и что любая другая часть организации должна быть подчинена ей. Состав персонала зависит от мощности установки, числа агрегатов, сложности компоновки^ а также от того, будет ли ГЭС автоматизирована или. без автоматизации. Состав персонала также зависит от того, насколько установка будет удовлетворять свои нужды в части эксплуатации, расчетов снабжения и т. п.

На ГЭС средней мощности обычно должны быть четыре оперативные группы; I)*,персонал, связанный с эксплуатацией генераторного оборудования, контролем выработки и использованием водного стока; этот персонал работает посменно и потому находится на работе в любое время; 2) персонал электроцеха; 3) персонал механического цеха; 4) инженер, ведущий прогнозы, а также ведающий учетом и планами выработки электроэнергии.

На рис. 129 показана схема организации современной низконапорной ГЭС мощностью 160 тыс. *кет* с восемью одинаковыми гидроагрегатами.

Поскольку количество оперативного персонала определяется потребностью при аварийных случаях работы, оборудование ГЭС должно быть рассчитано на достаточный срок службы без вмешательства персонала. Совершенно необходимыми являются простота и надежность всех элементов по управлению ГЭС, включая детали; при этих условиях аварийность может быть сведена к минимуму. Проектом должна быть предусмотрена наибольшая возможная централизация управления ГЭС и обеспечены удобства для быстрой проверки и ремонта сооружений и оборудования. Распо-

[1] Глава дана в сокращенном переводе. Рекомендации, приведенные в главе, характерны для условий США

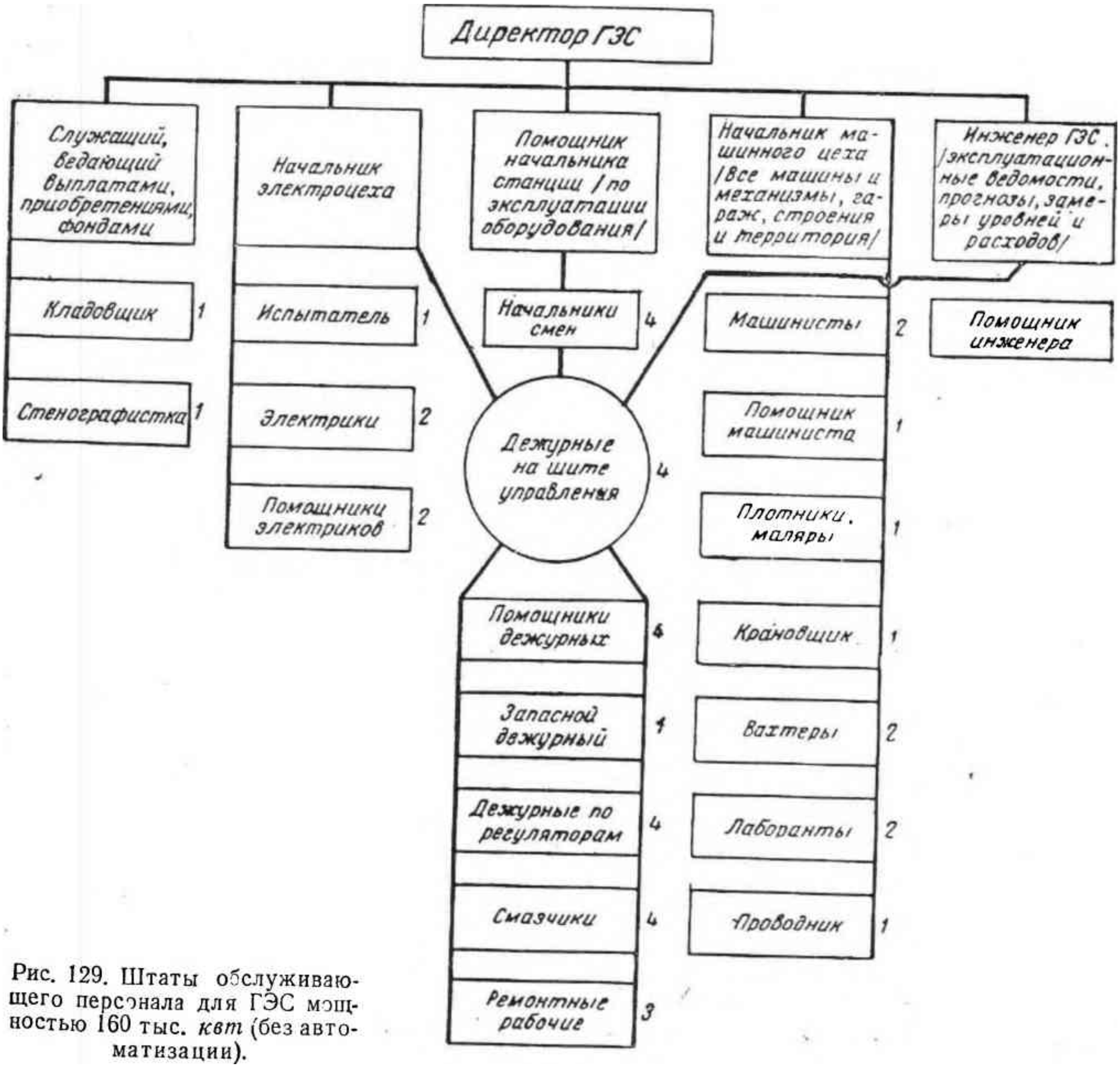


Рис. 129. Штаты обслуживающего персонала для ГЭС мощностью 160 тыс. *квт* (без автоматизации).

ложение оборудования, количество пунктов обслуживания на разных отметках, устройство сороудерживающих решеток и очистных машин, защита от льда—все это оказывает влияние на количество персонала, необходимого* для обслуживания. Для получения минимальной стоимости эксплуатации должна быть обеспечена тесная связь проектировщиков с эксплуатационным управлением еще в процессе проектирования ГЭС.

Современная тенденция состоит в организации эксплуатации малых ГЭС с помощью полуавтоматического оборудования с периодическим надзором. Такие ГЭС требуют периодического посещения дежурного, который может обслуживать две или три гидроэлектростанции. Иногда и более крупные ГЭС (до 20 тыс. *квт)* управляются на расстоянии. Для неавтоматических ГЭС мощностью до 20 тыс. *квт* требуется один дежурный в смену (или 4,5 дежурного на ГЭС) для обычных условий эксплуатации, если не требуется проводить крупных ремонтных работ. При наличии нескольких ГЭС многие энергосистемы обеспечивают дешевую эксплуатацию с помощью группы персонала, которая перемещается от одной ГЭС к другой.

На хорошо автоматизированных ГЭС мощностью до 100 тыс. *квт* требуются четыре — шесть дежурных в смену, для ГЭС мощностью до 200 тыс. *квт* — шесть — девять дежур-

ных в смену. Общее число дежурных для установок этой мощности меняется от 18 до 36.

На таких ГЭС обычно имеются три — пять электриков и четыре — шесть механиков. Полное количество дежурного и обслуживающего персонала, включая руководство для ГЭС этой мощности, не должно превышать 30—50 чел. Дежурные подбираются по их умению и опыту работы с оборудованием электростанций, их оперативности и способности быстро реагировать в аварийных случаях.

Для новой ГЭС дежурные на щите управления должны быть очень тщательно подготовлены; целесообразно привлекать опытных людей с других ГЭС. Их помощниками могут быть некоторые из тех, которые работали на электромонтажных работах в процессе строительства. Небольшое число персонала можно набирать из молодых людей, проживающих в близлежащих населенных пунктах, которые в дальнейшем будут постоянно работать на этой ГЭС.

Каждый дежурный должен сдать экзамен на знание работы с оборудованием. Особенно тщательно подготавливаются дежурные электрики и дежурные на оборудовании гидросооружений. Очень полезно, если дежурный персонал ГЭС принимает участие в приемных испытаниях оборудования и сооружений; особенно ценно, если эксплуатационный персонал работал на строительстве.

Для успешной эксплуатации должны быть обеспечены надежные линии связи для возможности своевременного предупреждения об аварийных состояниях и поддержания связи между гидроэлектростанциями. Средства связи могут включать в себя внутренние телефоны на ГЭС, специальные телефонные линии между гидроэлектростанциями, высокочастотные каналы связи и в некоторых случаях радио. Если возможности связи ограничены, то ГЭС может работать удовлетворительно, но управление ею будет ограничено.

Недостаточная связь приводит к тому, что выработанная на ГЭС электроэнергия не вполне правильно распределяется в общем графике нагрузки энергосистемы. Хорошо организованная связь позволяет сделать ГЭС неотъемлемой частью энергосистемы.

Весьма желательно, чтобы в процессе эксплуатации ГЭС имел место инженерный контроль организации эксплуатации во всех звеньях ее работы. На малых ГЭС этот контроль может осуществляться одним человеком, на крупных объектах должна быть предусмотрена специальная служба.

Для установок мощностью 100 тыс. *квт* должна затрачиваться значительная сумма на гидрологические прогнозы; не менее двух инженеров должны заниматься этим вопросом. Инженерная служба ГЭС должна располагать всеми необходимыми приборами для производства измерений: осциллографами, счетчиками выработки, частотомерами и т. п.

При планировании режима работы ГЭС персонал должен располагать всеми необходимыми тарировочными данными по турбинам и генераторам. Испытания турбины должны охватывать все открытия направляющего аппарата и должны проводиться при всех скоростных 'режимах, которые могут встретиться в эксплуатации. В противном случае, если действующий напор будет отличаться от напора в период испытаний, будет трудно использовать турбины как измеритель расхода. Лучше всего произвести тарировку турбины в процессе приемных испытаний. Испытания генератора проводятся на все нагрузки. После проведения полных испытаний гидроагрегата могут быть построены эксплуатационные характеристики, показанные на рис. 130. Они обычно строятся на период 1—2 лет. Одновременно с испытаниями турбин проводятся испытания регулятора на временную и остаточную неравномерность и чувствительность.

Важным фактором в организации эксплуатации ГЭС является получение прогнозов стока и выработки электроэнергии. Для этой цели требуется •наличие дождемерных станций в бассейне реки выше плотины и ряда гидрометрических постов. При проведе-

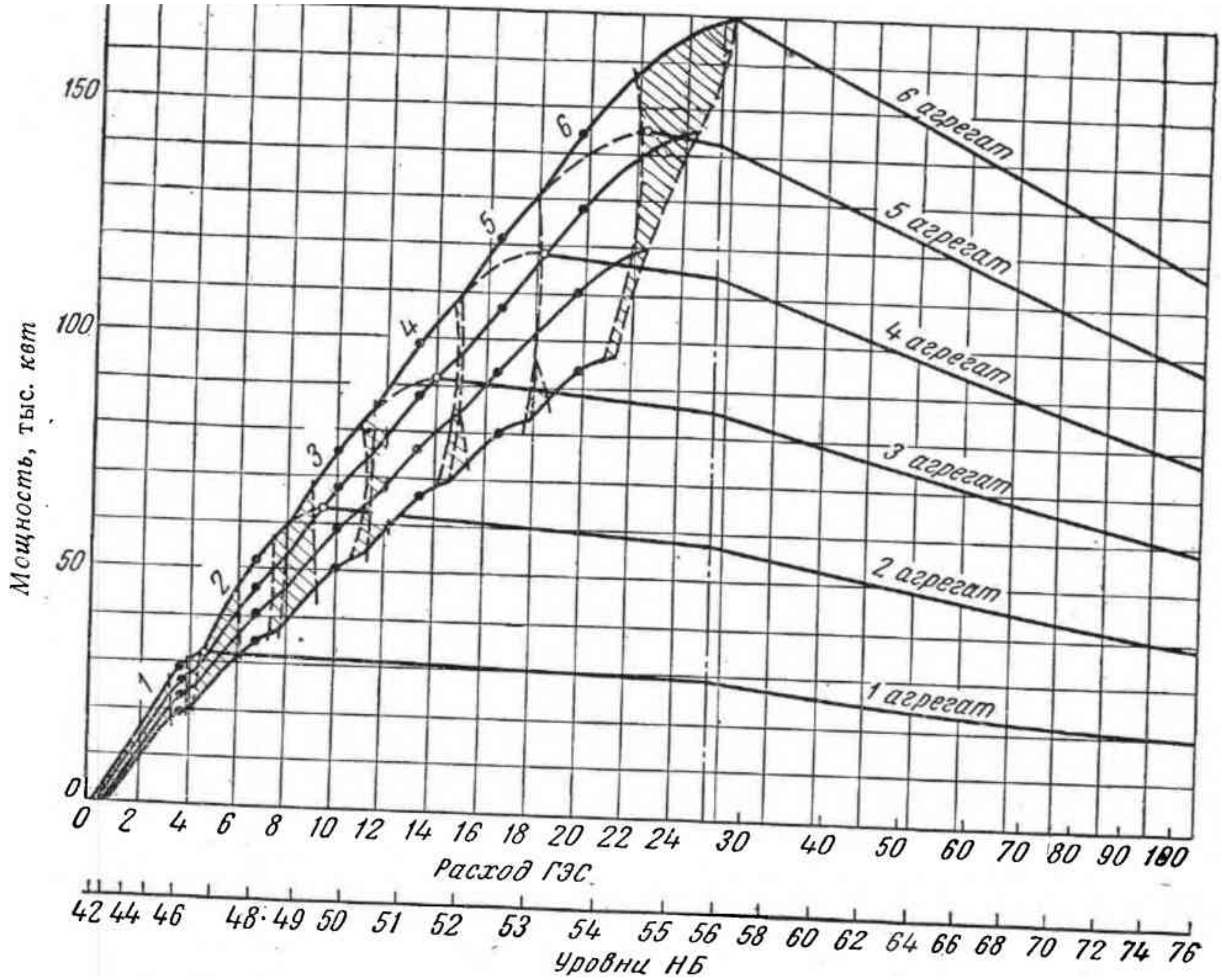


Рис. 130. Эксплуатационные кривые для ГЭС мощностью 160 тыс *квт*
(расходы-в *фут* [сек,* уровни - в футах).

ции I.----- ®t hx наблюдений должна быть проведена тщательная 1 тщательная кооперация ГЭС с соответствующими [организациями. Необходима установка дополнительных постов для регистрации подпорных уровней, в особенности В зонах, где возможно подтопление. с*ти посты полезно установить за 1____ года до наполнения водохранилища с тем чтобы можно было получить оценку влияния подпора.

Целесообразно обеспечить съемку поперечных сечений водохранилища приурочив основные створы к мостовым переходам или каким-либо постоянным предметам на берегах, с тем чтобы можно было вести регулярные наблюдения за заилением водохранилища. Должна быть обеспечена система измерителей уровней в верхнем^ и нижнем бьефах с автоматической передачей записей на nnv ПрИ за,мерах Уровней на больших водных пространствах желательно иметь в зоне наблюдений флюгер ДЛЯ записи направления и силы ветра. ^с,чень крупных водохранилищ ри большом объеме испарения должг ны ыть предусмотрены испарительные станции.

Очень важно обеспечить регулярную ежечасную запись всех показаний измерительных приборов в течение суток в особую ведомость. В этих ведомостях должны фиксироваться все нарушения нормальной работы ГЭС для принятия своевременных мер. Полезно составлять итоговую сводку за неделю, в которой могут быть четко прослежены все особенности работы ОС за этот период. Некоторые данные, имеющие значение для установления режима работы ГЭС, передаются в центральное диспетчерское управление.

В дополнение к суточным ведомо- ДеЖурнЫЙ пеРС0Гал должен пе- 4 давать регулярные отчеты о перио- ги?тпапХ 0СМ0Трах общего состояния гидроэлектростанции. Эти осмотры

особенно важны в тех случаях, когда наблюдаются осадки сооружений, фильтрация, оползание берегов, промоины и т. п. Регулярные отчеты являются основанием для своевременных ремонтных мероприятий.

29. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

'Под эксплуатацией оборудования понимаются надзор и уход за машинами и механизмами и поддержание их в нормальном эксплуатационном состоянии. Использование гидроагрегатов как энергопроизводящих единиц рассматривается в разделе диспетчерского регулирования и планирования выработки станции. Персонал турбинного цеха и электроцеха следит за смазкой оборудования, температурой в опорных частях, температурами генератора, трансформатора и охлаждающей воды и наблюдает за тем, чтобы все оборудование работало в безопасных условиях. Дежурные сообщают диспетчеру необходимые данные о состоянии оборудования, поднимают и опускают затворы гидросооружений и ведут наблюдения за уровнем воды под общим руководством инженеров

Дежурный персонал должен быть снабжен подробными аварийными инструкциями на случай коротких замыканий, пожаров, «внезапных паводков, травм персонала. Эти инструкции должны разъяснять задачи, стоящие перед персоналом по ликвидации аварии в самом начале ее возникновения независимо от того, могут ли быть об этом поставлены в известность вышестоящие инстанции., или нет.

Дежурный начальник смены должен располагать не только солидной подготовкой и эксплуатационным опытом, подробным знанием гидравлического и электрического оборудования, но также знать эксплуатационные условия системы, частью которой является 'эксплуатируемая ГЭС.

Дежурный персонал должен проходить регулярную тренировку по ликвидации аварийных состояний, с тем чтобы не допускать отключения оборудования. Каждому дежурному должны быть вручены подробное описание всей ГЭС, необходимые чертежи, а также инструкции по эксплуатации специальных видов оборудования независимо от того, каковы непосредственные обязанности этого дежурного, с тем чтобы он мог в напряженный момент выполнять любые задачи. Очень полезны для проверки и подготовленности персонала внезапные инспекторские наезды. Для повышения квалификации дежурного персонала необходимо широко практиковать выезды на другие ГЭС энергосистемы для знакомства с ^оборудованием и людьми на других объектах. Следует обеспечить персонал необходимыми техническими журналами и по возможности организовывать специальные курсы по повышению квалификации.

Все распоряжения по распределению нагрузок между агрегатами и линиями передач производятся из центральной диспетчерской, оттуда же получается разрешение на пуск и остановку агрегатов, вывод их в ремонт и т. п. Диспетчер должен находиться па диспетчерском пункте ежеминутно, работая по 8 *ч*. Диспетчер получает часовые или получасовые сведения от всех дежурных системы, с тем чтобы иметь полную картину работы всех ГЭС и линий передач.

Для защиты системы в грозовые периоды применялась практика разделять систему па несколько самостоятельно работающих секций, с тем чтобы уменьшить влияние поражения линий передач молнией. В последующем, с введением соответствующей защиты и быстродействующих регуляторов надобность в этом отпала, хотя многие системы до сих: пор имеют большой вращающийся резерв, с тем чтобы на случай деления системы каждая ее часть могла нести свою нагрузку.

В дополнение к инструкциям по восстановлению работы ГЭС дежурный инженер должен располагать рекомендациями по предупреждению обесточивания соседних линий и быстрой постановке их под напряжение после аварии, не дожидаясь распоряжения центрального диспетчера.

Весьма желательно, чтобы диспетчер подготавливал графики на-

грузок заблаговременно. При этом должны быть учтены потребная нагрузка в течение дня, ожидаемые условия погоды и предполагаемый режим основных потребителей. Прежде всего при составлении графика нагрузки на следующий день должны быть учтены режим реки и ее водность, так чтобы вся возможная энергия была использована, а -остальная часть нагрузки передана тепловым станциям. Желательно эти планы иметь к 15 *ч* предшествующего дня. Фактическая нагрузка на электростанциях может измениться; при этом избыточная нагрузка распределяется между электростанциями системы. Существует обычная практика обеспечения вращающегося резерва, равного мощности наиболее крупного агрегата, который может выйти из строя. Желательно этот вращающийся резерв разделить между элементами системы.

Одной из основных задач энергосистемы является выработка электрического тока с постоянной частотой в течение суток. Допускаются весьма небольшие колебания в ту или другую сторону. В течение дня диспетчер определяет, в какой период какая электростанция несет ответственность за поддержание частоты. При сложных системах с разветвленными линиями связи должен быть сделан подробный анализ условий постоянства частоты в системе. В качестве мероприятий могут служить стабилизация регулятором нормальной -скорости вращения агрегатов, быстрое введение в действие вращающегося резерва и распределение нагрузки между агрегатами таким образом, чтобы возникающее повышение или понижение нагрузки распределялось поровну между всеми агрегатами.

Продолжительность жизни и качество работы оборудования зависят от качества смазки всех изнашивающихся поверхностей. Вопрос смазки очень сложен и должен быть специально рассмотрен в проекте и плане эксплуатации, с тем чтобы соответствующий смазочный материал поступал нужного качества и в необходимом количестве. При тщательной смазке турбины могут длительно работать без наблюдений. В проекте турбины должны быть предусмотрены устройства, . обеспечивающие подвод смазочных материалов из какого-нибудь центрального пункта. При длинных линиях смазки необходимо предусматривать самостоятельные смазочные отверстия. Очень удобны смазочные установки высокого давления.

Из рабочих элементов турбины должны быть особенно подвержены надзору направляющие лопатки, с тем чтобы предупредить истирание их осей и износ наносами. Целесообразно вести специальный учет процесса смазки ’ с регистрацией в журнале качества смазочного материала и его количества. Должны вестись наблюдения за температурой опорных частей. Если применяется водяное охлаждение для масла, необходимо контролировать расход воды. Смену масла желательно производить один раз в год. Если в условиях сурового климата применяется только одно масло для зимы и лета, то желательно выбрать такое, которое имеет минимальное колебание вязкости с изменением температуры. Периодически осматривается масляный резервуар. Обычно для всех элементов турбины применяется одно минеральное высококачественное масло Среднего удельного веса со стандартной вязкостью при 20° G. Хорошим приемом поддержания должного качества масла является система обводных труб, работающая на центро- . бежном аппарате. Где такая система невозможна, необходимо проверять качество масла ежегодно. Перед фильтрованием масло должно отстаиваться в течение 10 дней для осаждения механических примесей. Не следует допускать в старое масло добавок нового больше 10%' во избежание вспенивания.

Генераторы должны протираться регулярно. Это относится особенно к генераторам, работающим не на замкнутой системе вентиляции. Для очистки применяются различные методы; обычно удобно использовать струю воздуха или мощное отсасы-

вание. Воздушная струя должна быть сухой и выходить не под очень большим давлением. Доступные части обтираются тряпками. Особое внимание должно быть обращено на то, чтобы масло не попало на обмотку генератора. Масло не только повреждает изоляцию, но и способствует накоплению пыли, которая затвердевает и может вызвать незаметное разрушение изоляции. Обмотка генератора регулярно проверяется мегомметром.

Регулятор состоит из очень тонких деталей, трубок и кранов; выход из строя одного из элементов приводит к неправильной работе регулятора. Ни один из элементов оборудования ГЭС не подвержен так влиянию пыли и грязи и недостаточной смазки, как регулятор. Попадание пылинки на маятник регулятора уже приводит к его неправильной работе. Поэтому все части регулятора должны ежедневно протираться тряпками. Для регулятора желательно брать масло с несколько пониженной вязкостью. Устанавливается тщательный надзор -за смазочным насосом и сливом масла. Необходимо иметь в виду, что тщательно смонтированный и правильно смазанный регулятор может работать очень долго без ремонта. Для надзора за регулятором необходимо использовать подготовленного^ сотрудника, знакомого со сложной схемой регулятора.

30. содержание здании И ОБОРУДОВАНИЯ

Содержание зданий и оборудования должно быть организовано до ввода ГЭС в эксплуатацию и должно проводиться на высоком уровне, лохое содержание всего хозяйства 03Начает ПЛОХУЮ эксплуатацию. Можно считать, что гидроэлектростанция, содержащаяся в чистоте и порядке, является надежной и в работе.

Наилучшее обеспечение хорошего содержания ГЭС достигается регулярной проверкой. В дополнение к проверке, проводимой дежурным персоналом, должны быть организованы инспекторские обходы с соответствующей регистрацией всех замеченных неполадок. По крайней мере один раз в год должен быть проведен полный инспекторский осмотр всей ГЭС, преимущественно в период летней межени, когда можно останавливать турбины. При этих осмотрах особое внимание должно быть обращено^ на фильтрацию в обход сооружений, разрушение материалов сооружений и должен быть проверен уровень обслуживания ГЭС.

Особое внимание должно уделяться тщательному надзору за турбинами. Следует регулярно по виброметру проверять вибрацию турбины. Эти измерения дают возможность своевременно подметить возникающие нарушения в работе турбины. На каждую турбину заполняется специальная учетная карточка. При работе в турбинной шахте должно быть обращено внимание на создание условий для работы в ней персонала. В теплую погоду нужно обеспечить подачу свежего воздуха, а в холодную следует осуществлять подогрев воздуха. При производстве сварки в шахте необходимо обеспечивать тщятельную вентиляцию. Весь инструмент должен работать на напряжении *оЛ в*.

Периодический осмотр турбины и ее рабочих частей может быть проведен по следующей схеме:

з) Производится очистка водного тракта от леса, камней и сора; внутренняя поверхность спирали и другие элементы проточной части очищаются от отложений железобактерий. На одной ГЭС мощностью 40 тыс. *кв?* потери мощности снижались на 700 *кет* только от очистки поверхностей металлическими скребками.

б) Тщательно осматриваются лопатки рабочего колеса и направляющего аппарата и проверяется наличие износа от кавитации и наносов. Особо тщательно осматриваются опорные кольца, кромки лопаток и опорные части лопаток направляющего аппарата. Производятся смазка цапф и втулок направляющих лопаток и наблюдение за выходом масла из верхнего и нижнего уплотнений.

в) Проверяется прочность всех подвижных элементов турбины, контролируются зазоры в направляющих •подшипниках ротора.

г) Производится контроль утечки воды при закрытом направляющем аппарате; если какие-либо лопатки не в порядке, необходимо их заменить. Проверяются зазоры при закрытых лопатках и открытие направляющего аппарата.

д) Контролируется дренажный клапан.

е) После окончания осмотра все люки плотно закрываются.

В последние годы на многих ГЭС наблюдаются значительные кавитационные явления. Поэтому с первого же времени эксплуатации необходимо наладить регулярный контроль за состоянием поверхности рабочих органов турбины. Обычно наибольшее развитие кавитационных явлений наблюдается в период межени, а также при больших нагрузках турбин. Необходим регулярный надзор за процессом кавитации "и осуществление ремонтных мероприятий, не допуская развития опасных разрушений.

В большинстве случаев наилучшим способом восстановления поврежденных деталей является электросварка. Для небольших разъеданий глубиной 6—12 *мм* наилучшим приемом является использование электродов из нержавеющей стали (18% хрома и 8% никеля). При сварке необходимо следить за тем, чтобы не было местного перегрева. Заваренные поверхности зачищают и заглаживают так, чтобы не допустить образования выступов, которые сами могут явиться источником кавитации. Нержавеющая сталь должна содержать не более 0,07%' углерода. При глубоких повреждениях заварку целесообразно производить двумя электродами из малоуглеродистой стали, затем хромистой сталью (18% хрома) и завершать все электродами из нержавеющей стали указанного выше состава, Такой прием снижает стоимость сварки и обеспечивает хорошее сцепление со свариваемой поверхностью.

Некоторые рабочие колеса с успехом восстанавливались путем накладок из нержавеющей стали на поврежденные места. Другие приемы защиты, как, например, накладка бронзовых и медных пластин, металлизация поверхностей, покрытие резиной и т. п., используются с переменным успехом. Общие методы защиты и восстановления не разработаны и для каждого случая специфичны.

Уход за генератором включает в себя проверку ‘ качества изоляции, регулярную окраску и очистку поверхностей. Проверяются плотность болтовых соединений и крепление полюсов к ободу ротора. Регулярно контролируются электрические соединения. Проверяются зазоры между ротором и статором в четырех положениях.

Контроль регулятора заключается в тщательной проверке всех его движущихся деталей.

Одной из важнейших задач эксплуатации является поддержание в чистом состоянии сороудерживающих решеток. Нарушение нормальной работы водоприемных отверстий? имело место вследствие забивки решеток листьями, сором, льдом и шугой.

Для предупреждения персонала о появлении донного льда или шуги перед решетками должны быть опущены термометры и индикаторы образования шуги. Обогрев решеток должен находиться в полной готовности в течение всей зимы. На многих ГЭС смонтированы решетки с механической очисткой. Обычные типы сороочистных машин пригодны для мелкого сора, на гидростанциях **же,** на которых наблюдаются карчи,, бревна и другой'крупный сор, должны быть смонтированы грейферные краны. Засорение решеток вызывает большую потерю напора, и потому организация наблюдений за чистотой: решеток весьма ответственна. Для защиты от сора и льда в процессе эксплуатации монтируются плавучие запани различных конструкций.

Особый уход должен быть за бетонными сооружениями в местностях, где наблюдаются частые смены замерзания и оттаивания. Разрушение поверхностей имеет место при пори-

стом бетоне или большом содержании воды в нем. Каждая плоскость бетонного массива, подверженная действию атмосферных процессов, должна быть выполнена с уклоном не менее 1 : 60 и отводом воды <в дрены. Ни в коем случае нельзя допускать застаивания воды на горизонтальных поверхностях бетона и стекания струек воды по вертикальным поверхностям. Не следует допускать нахождения на бетонных поверхностях влагопоглощающих предметов. Все трещины должны своевременно торкретироваться и покрываться каким-либо гибким покрытием. Тщательно обследуется состояние швов расширения. При ремонте поверхностей необходимо обеспечить хорошую связь нового бетона со старым. При Крупных повреждениях укладываются толстые бетонные слои, иногда армированные.

Для окраски металлических конструкций лучше всего использовать краску с алюминиево-бронзовым порошком. Для окраски внутренних поверхностей трубопроводов целесообразно использовать красную олифу с добавкой 6% свинцового глета повесу. для первого слоя окраски и /о для второго и следующих. Для стальных поверхностей в стоячей воде добавку свинцового глета в количестве 6% следует производить только для третьего слоя. Использование горячих битумных обмазок для подводных поверхностей применялось с переменным успехом. Очень немногие краски и антикоррозийные материалы могут держаться больше 3—4 лет, поэтому необходимо производить регулярную окраску.

31. ОРГАНИЗАЦИЯ ВОДНОГО РЕЖИМА

Каждая гидроэлектростанция должна производить определенную работу по регулированию речного стока. Контролируются минимальные и паводковые расходы реки. Фиксируются наивысшие уровни в верхнем оьефе. Пр,и наличии регулирующих затворов на гребне плотины поддержание уровней в верхнем бьефе может быть осуществлено автоматически Ьольшинство современных ГЭС имеет за водосливом водобойную часть, сводящую к минимуму размыв за’ плотиной. Характер креплений подбирается на модели. Однако предвидеть точные пределы размыва невозможно поэтому необходимо организовать определенный режим работы водосбросных отверстий по заранее заданной программе, которая обеспечит наилучшие условия для устойчивости нижнего бьефа. В некоторых случаях целесообразно сосредоточить сброс воды через водосбросные отверстия на определенных частях водосбросного фронта, на которых будет наименьший размыв.

Наиболее сложной задачей является определение максимальных паводков.] В процессе эксплуатации на основании '....л полученных данных наблюдений по дождемерной и водомерной сетям составляются прогнозы паводков и прогноз уровня в водохранилище.

Между проектными предположениями и фактическими условиями работы оборудования и сооружений имеется некоторое расхождение. Для ликвидации его и изыскания наиболее целесообразных и эффективных мер использования ГЭС эксплуатационный персонал должен вести непрерывную работу. На каждой ГЭС имеется очень много возможностей по изысканию наиболее экономичных режимов работы агрегатов и сооружений. 1 акие вопросы, как чувствительность регулятора, время запуска машины и принятия агрегатом нагрузки, должны находиться под пристальным наблюдением персонала. Наблюдается тенденция, после того как машина поставлена под нагрузку, держать ее некоторое время на уменьшенной нагрузке, с тем чтобы быть уверенным в отсутствии последующего наброса. Дежурный персонал должен следить за ежечасной выработкой 1 ЭС, с тем чтобы непрерывно контролировать полноту использования оборудования.

Наивыгоднейший режим возникает при работе гидроагрегатов с максимальным к. п. д. Коэффициент полезного действия агрегата обычно является наивысшим при достижении

приблизительно 80 %[!] полной мощности. Многие агрегаты имеют пологую кривую к. п. д., причем при изменении открытия от 0,6 до 0,9 изменение к. п. д. не превышает 2%. Невозможно обеспечить постоянную работу всех агрегатов в зоне максимального к. п. д. ГЭС должна располагать специальными графиками и таблицами, которые помогают устанавливать наивыгоднейшие отношения для работающих агрегатов. Обычно дежурный диспетчер требует наличия на ГЭС некоторого вращающегося резерва. Какая-то часть его может быть получена при работе агрегатов с некоторой перегрузкой. Баланс резерва обеспечивается вводом дополнительных агрегатов. Вместо того чтобы допускать длительную работу агрегата на холостом ходу, целесообразнее переводить эти агрегаты в режим синхронного компенсатора.

При использовании турбин в режиме синхронных компенсаторов снижаются потери воды. Например, на одной ГЭС с диаметром рабочего колеса 4,5 *м* агрегат 9 тыс. *кет*, работающий в моторном режиме, требует 500 *кет* от системы. В то же время, если агрегат работает на холостом ходу, непроизводительный расход воды дает потерянную мощность 1 500 *кет.* Тот же агрегат, работающий в моторном режиме при закрытых затворах, но без отключенной всасывающей трубы, требует 2 тыс. *кет* от системы вследствие отсасывающего действия рабочего колеса. Там, где агрегаты используются только как синхронные компенсаторы, а не как вращающийся резерв, можно предупредить утечку через турбину путем закрытия верховых затворов, однако в этом случае необходимо обеспечить техническое водоснабжение агрегата.

Потери на утечку воды вызывают потерю энергии. Наиболее уязвимой частью являются затворы на турбинном трубопроводе. В первый период работы ГЭС утечка через затворы обычно ничтожна. Однако с течением •времени она может увеличиться до ощутимой величины. В течение маловодного периода, когда часть агрегатов стоит, утечкц на агрегатах могут привести к существенному уменьшению выработки. В отдельных случаях утечка через затворы достигает 4% от общего расхода ГЭС.

Наибольший зазор в уплотнении затвора может иметь место на высоконапорных турбинах, поскольку утечка мутной воды может вызвать истирание его кромок. Утечка через затворы перед турбинами отличается от утечки через зазоры рабочего колеса тем, что она отражается на мощности турбины. На высоконапорных турбинах с низким коэффициентом быстроходности поддержание необходимых зазоров у лопаток рабочего колеса весьма важно, так как даже на новой машине утечка через, эти зазоры может доходить от 1 до 3%. При мутной воде размер зазоров очень быстро увеличится в 3—4 раза и к. п. д. агрегата может снизиться на 3—10%. Кавитационное разъедание рабочего колеса редко влияет на к. п. д. агрегата, если только разрушения не достигли очень больших размеров, влияющих на динамику обтекания. Но обычно еще до того, как это произойдет, прочность колеса настолько нарушается, что необходимо проводить ремонт.

За пропуском расходов через турбины должен быть организован периодический надзор. На трубопроводах устанавливаются водомеры Вентури, на малых ГЭС — водосливы в нижнем бьефе. На низконапорных установках, на которых такие замеры невозможны, расходы воды контролируются по выработке электроэнергии и производится регулярная тарировка турбины. Там, где не Производится полное измерение расходов, относительное потребление воды может быть получено по величине перепадов давлений в отдельных точках водного тракта. Эти перепады могут быть получены в трубопроводе при/ изменении сечения и направления течения. При соответствующей тарировке эти перепады могут служить расходомерами.

Авторы отмечают, что в условиях США не ведется тщательный учет продукции ГЭС. Это объясняется тем, что вода на ГЭС не имеет оплачиваемой.

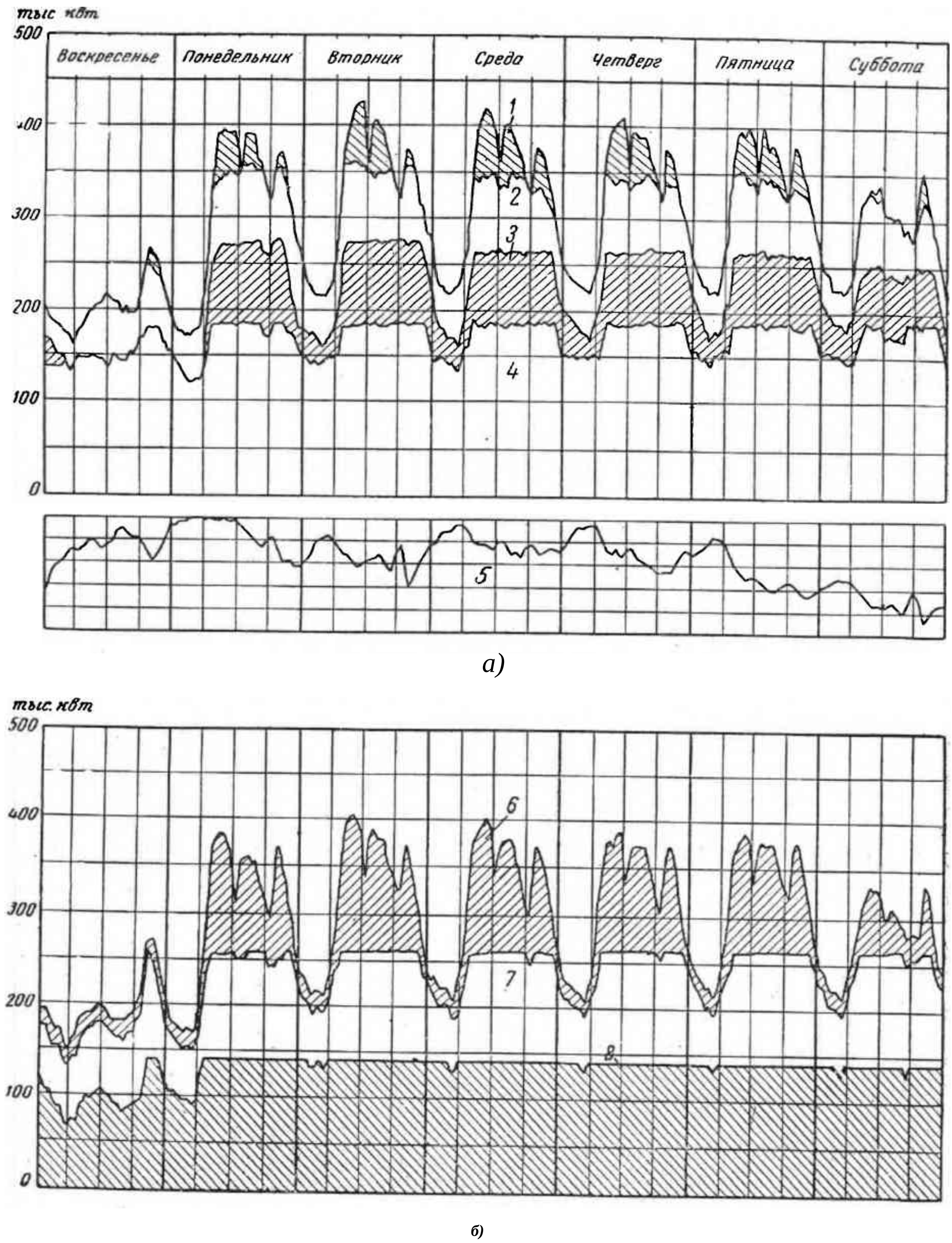


Рис. 131. Характерное распределение нагрузок в течение недели.

стпк?.оа ПрИ малом нап°ре; *б* — раб°та при большом капоре; *1* — пиковые гилпостанпии- 2 "гчг ц «
стоке, *3* -тепловые стэнции; *4* -основная тепловая установка; 5-уровни волох^
тепловая установка; *7* - гидроэлектростанции без регулирования; «- Si™ ГЭС." ввм

стоимости. Соответствующие отчеты по тепловым станциям дают необходимые сведения о расходах на продукцию с точностью до 1 цента; в то же время количество угля, сэкономленное от работы ГЭС, никем не подсчитывается. Имеются различные методы оценки эффективности гидроэлектростанции: *м [кет • ч,* полные потери воды и т. п. Одной из важнейших задач, с которой приходится встречаться эксплуатационному персоналу, является качественное использование суточного и недельного регулирования. В крупной энергосистеме могут быть ГЭС без регулирования, работающие на быто-

вом стоке при коэффициенте нагрузки 1'00%. Могут быть также ГЭС с обеспеченным регулированием, которые могут работать с небольшим коэффициентом нагрузки. На рис. 131 показано распределение выработки за неделю между двумя ГЭС: одной — пиковой, а другой — работающей на бытовом стоке. Весьма распространенная ошибка диспетчерского регулирования заключается в использовании емкости суточного регулирования в период пиковых нагрузок без повторного наполнения водохранилища. Это приводит к работе ГЭС на пониженных напорах. Тщательный анализ показывает, что целесообразно работать на наивысших уровнях бассейна суточного регулирования с минимальным сливом воды.

При развитых межсистемных связях эффективность работы каждой ГЭС должна рассматриваться с точки зрения выгодности системы. ГЭС наиболее гибко вписывается в график нагрузки энергосистемы. Поскольку себестоимость гидроэнергии весьма невелика в первую очередь должна использоваться вся выработка ГЭС. С этой точки зрения ГЭС до некоторой степени контролирует работу тепловых станций. При распределении нагрузок между ТЭС и ГЭС диспетчер должен тщательно учитывать как экономику каждой электростанции, так и специфические условия ее работы. Как правило, ГЭС используется в пиковой части графика. Однако при наличии нескольких ГЭС в системе часть их может нести базисную нагрузку. Также следует иметь в виду, что с течением времени роль электростанции в системе меняется с ростом нагрузок и изменением состава потребителей.

ЛИТЕРАТУРА

I. Creager W. P., Hinds J., Justin J. D., Engineering for dams, 1945, v. 11.

2’. Wegmann E., The design and construction of dams, 1927.

3. Rose E., Thrust exerted by expanding ice sheet, Proc. A.S.C.E., May 1946, p. 571.

4. Molitor D. A., Wave pressure on seawalls and breakwaters, Trans. A.S.C.E., 1935, p. 984.

5. Schrontz C. C„ Hydraulics Bull. I, U. S. Waterways Sta. Vicksburg, 1939, v. 2.

6. Westergaard H. M., Waterpressure on dams during earthquakes, Trans. A S.C.E., 1933, p. 1418.

7. Cain W., The circular arch under normal load, Trans. A.S.C.E., 1922, v. 85, p. 233.

8. Fo w 1 e r F. H., A graphic method for determining the stresses in circular arches under normal load by the Cain formulas, Trans. A.S.C.E., 1928, v. 92, p. 1512.

9. Jakobs sen B. E., Stresses in the arches of dams, Trans. A.S.C.E., 1927, v. 90, p. 484.

10. Jorgenssen L. R., The constant angle arch dam, Trans. A.S.C.E., 1915, v. 78 p. 685.

II. B act i cl e E., Mesneger E., Le flambent des arcs, Genie Civil, Fevr 2, Mars 29, 1929.

12. Houk I. E., Temperature variations in concrete dams, West. Constr. News, Dec. 10, 1930.

13. J u s t i n J. D;, Earthdam project, 1932.

14. Casagrande A., Seepage through dams, Journ. New Engl. Waterworks Assoc., June 1937.

15. H a r z a L. F., Uplift and seepage under dams in sand, Trans. A.S.C.E., 1932, v. 100.

16. Casagrande A., Trans. A.S.C.E., 1935, p. 1289.

17. Blaisdell F. W., Development and hydraulics design, St. Authony falls stilling basin, Proc. A.S.C.E., Feb. 1947.

18.. S t a n d i s h Hall L., Entrainement of air in flowing water, open channel flow at high velocyties, Trans. A.S.C.E., 1943.

19. S t a n d i s h Hall L., The influence of air entrainment on velocyties in the design of steep chutes, Proc. 3rd Hydr. Conf. Univ, of Iowa, 1946.

20. B o i s o n a u 11 F. L., Estimating data **for reservoir gates, Proc. A.S.C.E., Sept 1947.**